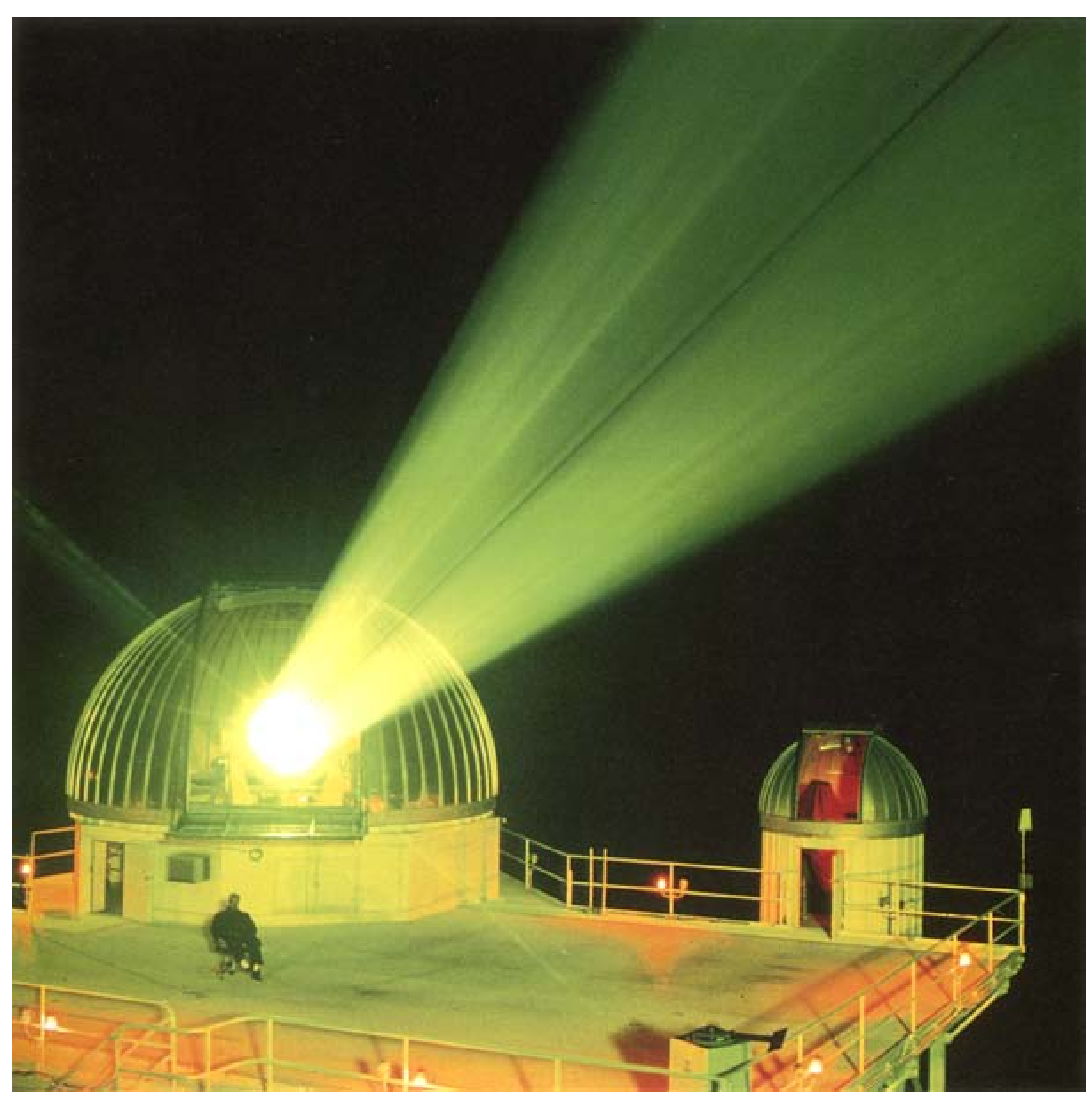
INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

EL LIMITE CLASICO DEL ATOMO

LA SALUD DEL MAR MEDITERRANEO

POLIMORFISMO DEL MHC Y ORIGEN DEL HOMBRE



OPTICA ADAPTATIVA

AGOSTO 1994
700 PTAS.



Agosto de 1994 Número 215

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

J. M. García de la Mora: *¿Existió o no la carrera hacia la Luna?, Cartas* y *Ensayo;* Santiago Torres: *Polimorfismo del MHC y origen del hombre*; J. P. Campos: *El límite clásico del átomo*; E. Santiago: *Emoción, memoria y cerebro*; J. M. Fullola: *Ciudades andinas de la antigüedad*; M. Murphy: *Optica adaptativa*; J. Ros: *El lenguaje de la danza de las abejas melíferas*; J. Vilardell: *Hace...y Taller y laboratorio*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; Shigeko Suzuki: *De cerca.*

Ciencia y sociedad:

Luis Bou, J. Oriol Pascual y E. Santiago

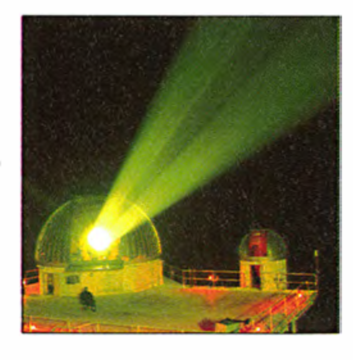
Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Roger Ressmeyer

Página	Fuente
6-7	Cortesía de Glenn Swanson, revista *Quest* (*izda.*), NASA (*dcha.*)
8	NASA (*arriba*), Sovfoto/ Eastfoto (*abajo*)
9	NASA (*sup. izda.*), UPI/Bettmann (*sup. centro*), NASA (*sup. dcha.*), Tass, Sovfoto/Eastfoto (*abajo*)
10	NASA (*sup. izda.*), AP/World Wide Photos (*sup. dcha.*), Sovfoto/ Eastfoto (*abajo*)
11	NASA (*arriba*), Sovfoto/Eastfoto (*inf. izda.*), A. Moklet Sov./Novosti Press Agency/Starlight Photo Agency, Inc. (*inf. centro*), cortesía de Alain Dupas (*inf. dcha.*)
12	NASA (*arriba*), cortesía de Glenn Swanson, revista *Quest* (*inf. izda.*), cortesía de Alain Dupas (*inf. dcha.*)
13	NASA (*arriba*), cortesía de Sotheby's (*inf. izda.*), Edwin Cameron (*inf. centro*) Tom Stafford, Vance Brand/Starlight Photo Agency, Inc. (*inf. dcha.*)
14-15	Tomo Narashima (*arriba*), Laurie Grace (*centro y abajo*)
16	Paul Travers, Birkbeck College, Universidad de Londres
17-19	Laurie Grace
20-21	Ian Worpole
22	James Montanus, Univ. de Rochester
23	Ian Worpole
24	Jack Harris/Visual Logic (*superior izda.*), Ian Worpole (*superior dcha.* e *inferior*)
25	Ian Worpole
26	Mafo Plata
39	Roberto Osti (*dibujos*), Andrew Leonard/APL Microscopic (*fotografías*)
40	Roberto Osti (*arriba*), Ian Worpole (*abajo*)
41	Ian Worpole
43	Ian Worpole (*dibujos*), Joseph E. LeDoux (*fotografías*)
44-45	Roberto Osti
46-47	Steven N. Patricia (*arriba*), Gabor Kiss (*centro*)
49	Shelia Pozorski y Thomas Pozorski (*izda.*), Steven N. Patricia (*dcha.*)
50-51	Shelia Pozorski y Thomas Pozorski
53	Roger Ressmeyer/Starlight Photo Agency, Inc.
54	Jared Schneidman/JSD
55	Jared Schneidman/JSD (*dibujos*), John W. Hardy (*fotografías*)
56-57	Jared Schneidman/JSD
60	William F. Towne
61-62	Tomo Narashima
63	Mark Moffett/Minden Pictures
64	Thomas Seeley
67	Museo Nacional Arqueológico de Tarragona n.º 45.456
68-69	NASA
70	J. Corbera (*arriba*), J. Ros (*abajo*)
71-72	Jordi Corbera
73	Enric Ballesteros (*arriba*), Antonio García Rubies (*abajo*)
74	Enric Ballesteros
75	Jordi Corbera
83-85	Kathy Konkle
86-89	Documents P.L.S.



La fotografía de la portada muestra el potente haz de láser *Starfire* que se genera en el laboratorio militar Phillips, de Nuevo México. Cuando se refleja en la estratosfera, el láser crea una estrella artificial de guiado que sirve para calibrar el espejo flexible del telescopio *Starfire* y compensar la turbulencia atmosférica. El funcionario sentado junto a la base de la cúpula avisa de la aproximación de aviones; entonces se apaga el haz, para proteger a los instrumentos y a los ocupantes (*véase* "Optica adaptativa", de John W. Hardy, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; John Rennie, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; Ricki L. Rusting; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.600	15.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Hace años que los ingenieros buscan un procedimiento de inyección de gasolina viable para alimentar de combustible a los cilindros de los motores. Según Donald P. Hess, presidente de American Bosch Corporation, ese procedimiento ya está perfeccionado y en fase de producción. En palabras de Mr. Hess 'la gasolina, por ese procedimiento, llega a todos los cilindros del motor de un modo uniforme. El resultado es que los cilindros empujan en armonía unos con otros, se crea así una generación de energía más suave y el motor funciona más silenciosamente que con cualquier otro procedimiento.'»

«Cereales disfrazados de barras de golosinas constituyen la última idea de la industria alimentaria, decidida a que comamos cereales, queramos o no.»

«Sería posible clasificar electrónicamente el correo si se empleara una o varias hileras de cuadrados blancos y negros para designar la primera subdivisión geográfica principal de las direcciones postales. Una segunda hilera identificaría la subcentral de correos y una tercera la estafeta correspondiente al distrito. De ese modo, los sobres pasarían por una máquina que los examinaría. Entonces, al agitarse cada carta delante de una célula fotoeléctrica, la máquina haría lo equivalente a leer la dirección en los cuadrados codificados y automáticamente la encaminaría hacia la saca o buzón correcto. Lo mismo se haría con la segunda hilera de cuadrados y otra vez con la tercera cuando la carta llegase al último subdistrito postal. Entonces sólo tendría que leerla el cartero.»

«El magnesio amenaza con remplazar al celuloide en la primacía del material inflamable más temido por la industria. La Comisión Nacional de Aseguradores de Incendios está preparando un informe especial para enseñar a controlar ese peligro en las fábricas. No figuran en el informe ninguna de las insólitas habladurías acerca de las factorías que prohíben a las empleadas usar ropa interior de seda (si es que pudieran conseguirla) por temor a que las chispas producidas por el frotamiento inflamen las virutas de magnesio desprendidas de los tornos.»

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «El treinta de junio de 1894 fue un día de gala en Londres, y ello con ocasión de la inauguración de un nuevo puente sobre el Támesis en las cercanías de la Torre. Se trata de una obra gigantesca, que ocupa una cantidad de espacio valioso muy superior a la necesaria. Pero quienes llevan la voz cantante consideraron que semejante obra, ubicada como está junto a la histórica Torre de Londres, debía ser monumental y ofrecer a la vista una muestra de arquitectura propia del Medievo. Así que hundieron en las estrecheces del río un par de grandes malecones, y en su lugar levantaron unos fuertes armazones de acero para suspender de ellos los cables y demás piezas; luego revistieron toda la obra metálica con una capa de piedra, con lo que el conjunto de la construcción parece representar una enorme estructura de fábrica.»

«A propósito de la última sesión de la Regia Sociedad, menciona *Lancet* el invento de Mr. C. T. Snedekor para calentar, mediante electricidad, edredones y cojines. Ese edredón, llamado termógeno por su creador, ya ha tenido ocasión de probarlo la revista y ésta no duda en informar favorablemente y sin reservas de que se trata de un utensilio que podría ser inestimable en todos los hospitales y, por supuesto, en todos los hogares que dispongan de tomas de electricidad.»

«Entre las diez y las once de la mañana del 16 de agosto de 1894, los ciudadanos de Buffalo (Nueva York) fueron invitados a presenciar un extraordinario fenómeno de espejismo protagonizado por la ciudad de Toronto, incluido su puerto y la pequeña isla situada al sur. Toronto está a noventa kilómetros de Buffalo, pero las agujas de sus iglesias pudieron contarse sin ninguna dificultad. Se conoce este fenómeno como espejismo de tercer grado. En estos casos, el objeto se eleva por encima de su verdadero nivel sin invertirse, como en los espejismos de primer y segundo grado, ofreciendo la visión de un paisaje incrustado en el firmamento.»

«Tal como muestra la ilustración, la embarcación inventada por el neoyorquino H. B. Odgen es impulsada en el agua del mismo modo que en tierra se impulsan las bicicletas. La embarcación es un ingenio de cierta longitud y de accionamiento sencillo, con la máquina propulsora instalada en su fondo sobre un especie de barca de latón o quilla de aleta, lo bastante espaciosa para acomodar los pedales. Según apreciamos, las cigüeñas del pedal hacen girar un engranaje conectado al tornillo sinfín de paso grande del árbol de la hélice; el gobierno se realiza mediante un timón conectado al manillar delantero.»



Velocípedo marino, lancha bicicleta de Odgen

Cartas

Libre comercio y ecología

Yo esperaba que "En defensa del libre comercio", por Jagdish Bhagwati, y "Los peligros del comercio libre", por Herman E. Daly [INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1994], ayudarían a poner fin a la confusión de ideas que reina en este campo. Pero, salvo algunos análisis penetrantes, los autores se empecinan en discutir entre sí y tirarse puyas como políticos en elecciones.

Ni el NAFTA, ni el GATT ni otros convenios comerciales internacionales permiten a los países restringir la importación de productos en razón del proceso de fabricación de éstos. ¿Por qué? Porque teóricamente un país podría, con sus leyes laborales, ambientales y sanitarias, bloquear todas las importaciones, dando al traste con las nociones tradicionales de soberanía y de ventajas comparativas. La respuesta —más fácil de enunciar que de llevar a la práctica— estriba en definir con precisión conceptos tales como 'soberanía nacional' mediante nuevas leyes de comercio que acaben con las infinitas amenazas que se ciernen sobre el entorno. Nadie ha razonado aún con coherencia por qué han de aceptar los EE.UU., con peligro de extinción para los delfines, tanta cantidad de atún como desee el GATT. La respuesta de Bhagwati, cual 'caja de Pandora', requiere la pregunta.

Daly tiene a su favor el haber acotado las ideas de escala viable de recursos, internalización del coste total y capital migratorio como los conceptos que podrían incrementar la integración del comercio y el ambiente. Pero Daly tiene un problema también: ¿Cómo van a reaccionar los países en vías de desarrollo ante una orden que prohíba su crecimiento? El desafío al que hacen frente Daly y las organizaciones ecologistas es el de la necesidad de definir con exactitud qué se entiende por 'desarrollo viable'... concepto tan atractivo cuan ambiguo.

WILLIAM J. SNAPE III
Asociación para la defensa
de la vida en libertad
Washington, D. C.

Bhagwati repite el dogma, socorrido y difuso, de que sólo los individuos y pueblos ricos se preocupan por los valores del entorno. Una encuesta reciente que sobre la salud de nuestro planeta ha realizado el Instituto Gallup pone en tela de juicio semejante creencia. En nueve de los doce países en vías de desarrollo encuestados, una mayoría de los que respondieron apreciaban la protección del medio por encima del crecimiento económico.

El autor del artículo en cuestión se aventura también por un terreno muy resbaladizo cuando cita el estudio de Grossman y Krueger en prueba de que "los ecologistas yerran al temer que el comercio, con su auge, aumente necesariamente la polución". Aquel estudio versa sólo sobre el dióxido de azufre, las partículas en suspensión y el humo, cuya disminución es de esperar que se logre a medida que las economías se vayan orientando hacia medios de generar energía que entrañen menos riesgos. Sin embargo, las economías avanzadas producen muchas más sustancias químicas tóxicas, muchos más residuos radiactivos, mucho más dióxido de carbono y muchos más factores destructivos de la capa de ozono. Los influjos de tales contaminaciones del medio son, a largo plazo, mucho más preocupantes.

Bhagwati acierta en un sentido: muchas de las diferencias entre los economistas y los ecologistas pueden atribuirse a malentendidos. Pero, como lo indica su artículo, no siempre son los ecologistas los que equivocan los conceptos esenciales.

TOM E. THOMAS
Junta Directiva
del Programa Ambiental

JAMES R. KARR
Instituto de Estudios Ambientales
Universidad de Washington

Bhagwati escribe que Grossman y Krueger demostraron que los niveles de dióxido de azufre bajan al subir la renta *per capita.* Dice que "la única excepción se dio en los países cuya renta *per capita* era inferior a los 5000 dólares", y supone que tales excepciones son raras. Pero según los datos del esquemático pastel de Daly, el 85 % de la población mundial sólo gana al año 1000 dólares *per capita.* O Bhagwati no ha aclarado debidamente su asunto, o es su argumentación, y no la de los ecologistas, la equivocada.

SEAN ALLEN-HERMANSON
Dartmouth, Nova Scotia

***Bhagwati replica*:**

Snape afirma que nadie ha hecho aún una defensa "coherente" de la decisión, impuesta por el GATT, respecto a los atunes y los delfines. ¡Qué tontería! Mi artículo hace ciertamente tal defensa. Después, cambia Snape de terreno y dice, en vez de eso, que mi artículo "requiere la pregunta". ¿Qué pregunta? ¿Por qué? Sus conclusiones son más obvias que sus argumentos.

Thomas y Karr no andan más acertados. Las preocupaciones por el entorno pueden entrecruzarse, y se entrecruzan de hecho, con los niveles de renta *per capita*: el Informe del GATT sobre Comercio y Ambiente lo dijo con toda claridad. Como yo escribía: "En los países ricos hay actualmente más grupos de personas que se preocupan por los factores medioambientales que en los países pobres". Esto es a la vez exacto y totalmente diferente de lo que afirman Thomas-Karr, ¡que yo creo que "sólo los individuos y los pueblos ricos manifiestan preocupación por los valores medioambientales"! Allen-Hermanson infiere a partir de mi escrito algo que yo ni defiendo ni creo.

***Daly replica*:**

Yo no apoyaría que al tercer mundo se le mandara no crecer, o, al menos, no todavía. El desarrollo viable debe comenzar en el norte y expandirse rápidamente hacia el sur. Pero el modelo en curso dista mucho de lo viable, y el norte no debería predicar lo que él ni siquiera trata de poner en práctica.

Definir el desarrollo viable no es tan difícil: consiste en la mejora cualitativa sin la expansión cuantitativa, concretamente sin un aumento de la utilización directa de los recursos que rebase la capacidad regenerativa de la naturaleza o su capacidad de reabsorber o reciclar los desechos. Los recursos no renovables no se están esquilmando más deprisa que se están desarrollando sus sustitutos renovables.



¿Existió o no la carrera hacia la Luna?

John F. Kennedy hizo cuestión de honor nacional el llegar los primeros a la Luna. Pero, ¿tenían los soviéticos posibilidades de ganar la partida?

John M. Logsdon y Alain Dupas

Hace veinticinco años, el 20 de julio de 1969, Neil A. Armstrong se convertía en el primer humano que pisaba la Luna. El acontecimiento constituyó una victoria política y técnica de los Estados Unidos en la guerra fría que mantenía contra la Unión Soviética. El Kremlin pondría, a partir de entonces, especial énfasis en negar que se hubiera empeñado en una misión parecida. Se trataba, decía, de un proyecto unilateral. La verdad, sin embargo, es muy otra. Los documentos de esos años, levantado ya el secreto oficial, y los testimonios de quienes ocuparon puestos clave bajo Jruschef y Breznief demuestran la realidad de la carrera por llegar antes a la Luna.

Las rivalidades personales, las cambiantes alianzas políticas y la rémora burocrática fueron, de acuerdo con esas fuentes, causa de interrupciones y retrasos en la ejecución del proyecto soviético de alunizaje. Por contra, el proyecto estadounidense recibió todo el apoyo político y un amplio respaldo social. La Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) y sus equipos de contratación se beneficiaron de un grupo nutrido de expertos competentes y entusiastas. A pesar de la inicial ventaja soviética en la exploración del espacio, esos factores, amasados con una generosa y eficaz asignación de recursos, permitieron a los EE.UU. ganar la competición.

La preparación soviética en el dominio espacial se hizo patente en octubre de 1957, cuando la URSS lanzó el *Sputnik 1*, el primer satélite artificial. Dos años después, despegaba una sonda espacial que suministró imágenes muy detalladas de la superficie lunar. Y el 12 de abril de 1961 Yuri Gagarin se convirtió en el primer cosmonauta humano. Los doctrinarios y jerarcas del régimen citaban esos logros como prueba indiscutible de que el comunismo era una forma superior de organización social y económica. La ventaja soviética avivó el temor norteamericano de quedar a la zaga en el desarrollo de misiles. Sobre esa preocupación insistió Kennedy en la campaña presidencial de 1960.

No estuvo claro en un comienzo que hubiera de entablarse una carrera espacial entre los EE.UU. y la Unión Soviética. De haberse seguido el criterio del presidente Dwight D. Eisenhower, tal competición ni siquiera se habría planteado. Eisenhower rechazaba la idea de que los éxitos espaciales reflejaran la potencia de un país; y se negó siempre a aprobar programas espaciales cuya justificación fuese meramente política. Lo que no impidió que, en julio de 1958, creara la NASA, organismo que recabó los fondos necesarios para poner en marcha un programa espacial civil. Quizá fuera inevitable que la NASA sostuviera que tal programa debería ser ambicioso.

El sucesor de Eisenhower en la presidencia, John F. Kennedy, se percató de que había un nexo mucho más directo entre la exploración del espacio y el liderazgo mundial. Estimulado por la impresión que produjo en todo el mundo la hazaña de Gagarin, Kennedy decidió que los EE.UU. tenían que superar a los soviéticos en viajes espaciales tripulados.

El 20 de abril de 1961, ocho días después de la gesta de Gagarin, le preguntaba Kennedy al vicepresidente

SE DISEÑARON grandes cohetes, en la URSS y en los EE.UU., para transportar el hombre a la Luna. El modelo soviético N-1 (*página siguiente*) fracasó en sus cuatro lanzamientos de prueba. La suerte sonrió, por contra, al *Saturno V* (*izquierda*), que se atuvo al calendario previsto y lanzó a los americanos a la Luna en julio de 1969.

Lyndon B. Johnson: "¿Hay algún proyecto espacial que prometa resultados llamativos en los que podamos salir ganadores?". Concretamente —seguía interesándose Kennedy— "¿tenemos alguna posibilidad de batir a los soviéticos instalando en el espacio un laboratorio, viajando en torno a la Luna o enviando allí a un hombre que se pasee por su superficie y regrese después a la Tierra?". Johnson, a quien Kennedy había nombrado su consejero en política espacial, organizó una intensa consulta de dos semanas en la que los especialistas deliberaron sobre la viabilidad de esas y otras alternativas. Una serie de memorandos registran las respuestas recibidas a las preguntas de Kennedy.

Entre los consultados se contaba Wernher von Braun, director de un equipo de ingenieros especializados en cohetes al que el ejército estadounidense había sacado de Alemania durante los últimos días del Tercer Reich. En una memoria fechada el 29 de abril, von Braun le decía al vicepresidente que "no tenemos ninguna posibilidad de batir a los soviéticos instalando en el espacio un laboratorio", pero "sí que tenemos ciertas posibilidades de enviar antes que ellos una tripulación de tres hombres que rodee la Luna" y "tenemos una excelente ocasión de superarlos con el primer alunizaje humano".

Estimaba von Braun que el alunizaje sería el mejor modo de ganar a los soviéticos, porque "para llevar a cabo semejante maniobra se necesita un cohete cuya potencia impulsiva sea diez veces mayor que la de los cohetes actuales, y aunque hoy no disponemos aún de tan poderoso artefacto, es improbable que los soviéticos lo tengan ya". El sugería que "con un gran esfuerzo inmediato, pienso que podríamos lograr ese objetivo en 1967/1968".

El 8 de mayo de 1961 presentó Johnson a Kennedy un informe en el que se reflejaban los resultados de su investigación. Iba firmado por James Webb, gerente de la NASA, y por Robert S. McNamara, secretario de defensa. Recomendaban ambos que los EE.UU. se propusieran conseguir el alunizaje humano "antes de que termine esta década". Aducían que "esta nación ha de decidirse a realizar proyectos que aumenten su prestigio. Nuestros logros son un elemento de suma importancia en la competición internacional entre el sistema soviético y el nuestro". Los dos firmantes citaban la exploración lunar y planetaria como "parte de la batalla empeñada a lo largo del variable frente de la guerra fría".

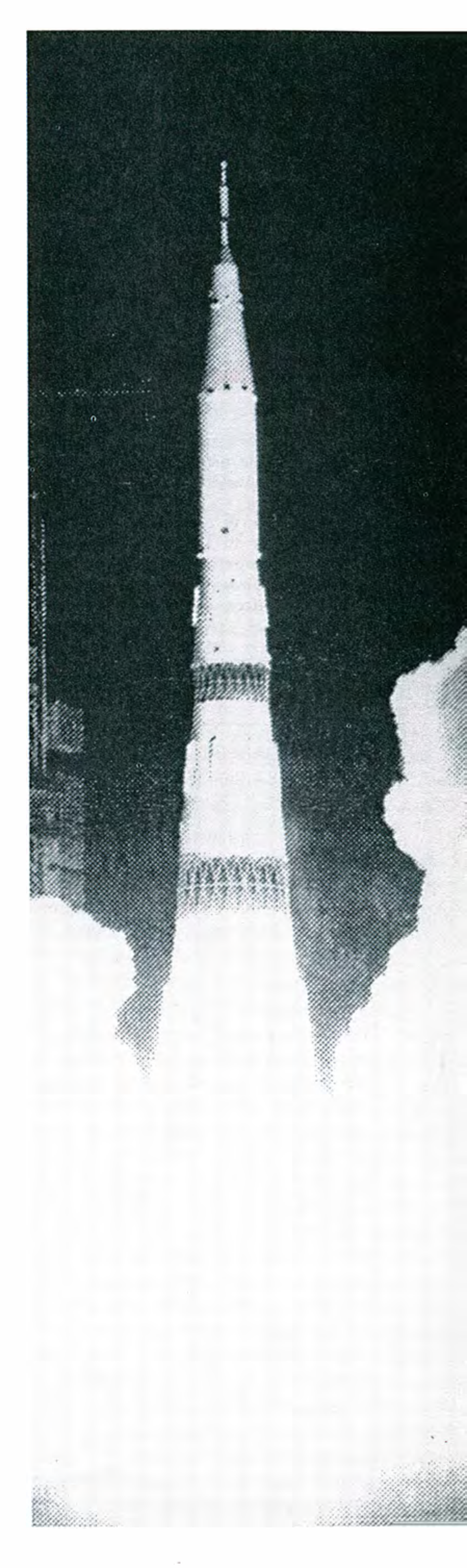
JOHN M. LOGSDON y ALAIN DUPAS colaboran en el análisis de programas de investigación espacial. Logsdon dirige el Instituto de Política Espacial de la Universidad George Washington, donde es profesor de asuntos internacionales. Dupas es experto de la Agencia Espacial Francesa.

Kennedy aceptó estas recomendaciones y las presentó el 25 de mayo en una sesión plenaria del Congreso, ante el que expuso: "Creo que debemos ir a la Luna. Ningún otro proyecto espacial de este período será más estimulante o impresionará más a la humanidad. Aunque no podemos garantizar que ese día seamos nosotros los primeros, sí que podemos garantizar que seremos los últimos en dejar de esforzarnos por conseguirlo." Kennedy hacía votos por que los norteamericanos pisaran la Luna "antes de que haya transcurrido este decenio".

La llamada a la acción suscitó una fervorosa respuesta popular. Durante las semanas que siguieron al discurso de Kennedy, apenas si se debatió lo acertado o no del compromiso de llegar a la Luna. En unos meses el Congreso incrementó un 89 % el presupuesto de la NASA, y al año siguiente se lo aumentó otro 101 %. Entre 1961 y 1963 la nómina de la NASA pasó de 16.000 empleados a más de 28.000, y el número de contratistas que trabajaban para el programa espacial pasó de ser menos de 60.000 a ser más de 200.000.

Durante el primer año siguiente a la exhortación presidencial se entabló un fortísimo debate técnico que pareció que iba a dar al traste con el propósito. La discusión se centró sobre cuál sería la estrategia más eficaz para enviar personas a la Luna en viaje de ida y vuelta. Una posibilidad era utilizar varios cohetes para poner por separado en órbita terrestre las piezas de un satélite y luego ensamblarlas allí y dirigir la nave hacia la Luna. Jerome Weisner, asesor científico de la presidencia, y algunos miembros de la NASA se inclinaron inicialmente a favor de este plan de "encuentro en órbita terrestre". McNamara se mostró también muy interesado por las posibles aplicaciones militares de las misiones en órbitas terrestres.

Mientras se estudiaba cómo responder mejor a la demanda de Kennedy de conquistar la Luna antes de que acabase el año 1969, en la NASA aumentaba el número de los partidarios de otro enfoque, el denominado "encuentro en órbita lunar". Según éste, debería enviarse entera la nave



Carrera espacial entre EE.UU. y la URSS

La competición por el dominio del espacio fue una manifestación de la "guerra fría". La URSS se apuntó los tantos iniciales con el primer satélite artificial y la primera puesta en órbita terrestre de una nave tripulada. Para contrarrestar la fuerza propagandística de esos éxitos, los EE.UU. hicieron un enorme esfuerzo por ser los primeros en pisar suelo lunar. A mediados de los sesenta, los soviéticos habían trazado su propio programa paralelo. Había comenzado la carrera hacia la Luna.

1961-1962, ESTADOS UNIDOS

A los cuatro meses de su toma de posesión, Kennedy expresó su deseo de conseguir el alunizaje antes del final de la década. La posibilidad de alcanzar este objetivo le había sido sugerida, entre otros asesores, por Wernher von Braun, ingeniero de cohetes. Al mismo tiempo, los EE.UU. estaban tratando de aminorar la ventaja inicial de los soviéticos en la carrera del espacio. El primer norteamericano que realizó un vuelo espacial fue Alan B. Shepard; nueve meses después, John H. Glenn igualaba la hazaña del soviético Gagarin.



1957- 1962, UNION SOVIETICA

El lanzamiento del *Sputnik 1*, el primer satélite artificial, cautivó la atención del mundo. En vuelos subsiguientes se puso en órbita a perros, que prepararon el camino para los vuelos tripulados. El 12 de abril de 1961, Yuri A. Gagarin dio la vuelta al planeta en la *Vostok 1*, hazaña que colocó a los soviéticos a la cabeza de la carrera espacial. "¡A ver si los países capitalistas son capaces de alcanzarnos!" se jactó Nikita Jruschef.



Ingeniero ultimando la puesta a punto del **Sputnik 1** *para su lanzamiento (1957)*



La perrita Maliszka *durante las comprobaciones previas a su vuelo (1958)*

Apolo al espacio en un solo lanzamiento para que orbitase directamente en torno a la Luna; un vehículo de menor tamaño se desprendería luego de la nave y transbordaría, desde la órbita lunar hasta la superficie de la Luna, a los astronautas, que a continuación volverían por ese mismo medio al *Apolo* y regresarían a la Tierra.

El encuentro en órbita lunar aminoraba muchísimo el peso total del *Apolo*, por lo que éste podría lanzarse con sólo el cohete *Saturno V*. Tras refutar las objeciones de Weisner, la NASA aprobó el proyecto del encuentro en órbita lunar, ante el convencimiento de que ofrecía las mayores posibilidades de llegar a la Luna dentro del plazo propuesto por Kennedy. A finales de 1962, EE.UU. iba por buen camino en su excursión a la Luna; no así la Unión Soviética.

La existencia del proyecto lunar soviético se mantenía en riguroso secreto. Pero nuestro conocimiento de la misma cambió gracias a la *glasnost* y el colapso de la URSS. Varios responsables del programa espacial de los años sesenta (en particular, Vasily P. Mishin, que dirigió de 1966 a 1974 los vuelos tripulados) han podido sacar a la luz sus recuerdos y anotaciones. El 18 de agosto de 1989, *Izvestia* publicó un informe, de extensión y franqueza sin precedentes, sobre el fracaso nacional en el asalto a la Luna. Y cada día es mayor la cantidad de fotografías y descripciones técnicas de los dispositivos y planes lunares que se viene poniendo a disposición de los analistas. Un reciente estudio de Christian Lardier ha servido para dar a conocer tal información. El resultado es una idea mucho más clara de cuáles fueron las auténticas proporciones del programa lunar soviético.

En junio de 1961, en su primera reunión cumbre con Nikita S. Jruschef, planteó Kennedy por dos veces la posibilidad de que los EE.UU. y la Unión Soviética viajaran juntos a la Luna. Jruschef no respondió nada, en parte al menos porque el anuncio que hizo Kennedy del alunizaje les cogió a los soviéticos por sorpresa. Los dirigentes de la URSS estaban tan confiados con las proezas espaciales de su país, que no habían previsto que los EE.UU. pudiesen competir de veras en ese palenque.

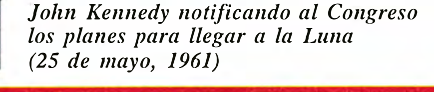
Transcurrirían tres años de debates antes de que el Kremlin decidiera, y sólo provisionalmente, que la Unión Soviética tuviera un programa de alunizaje. Durante ese lapso, poderosos y bien atrincherados jefes de las oficinas de planificación (organismos de los que dependían toda la industria y la técnica espacial) estuvieron luchando entre sí por la prioridad y por los recursos relativos a las misiones lunares. Aquellos conflictos fueron un obstáculo insuperable que imposibilitó el establecimiento de un plan de acción, único y coordinado.

Sergei P. Korolef, ingeniero espacial, dirigía una de las oficinas planificadoras. Era, en muchos aspectos, el equivalente ruso de von Braun. Korolef había diseñado el tipo de cohete que se utilizó hasta entonces en todos los lanzamientos espaciales soviéticos y había dirigido los programas de elaboración de la mayoría de las cargas que se introducían a bordo. Enérgico y entusiasta propugnador de los viajes espaciales, tal era el secreto que rodeaba a su persona que se aludía a él como el "Proyectista Jefe"; hasta después de su muerte no se reveló su nombre.

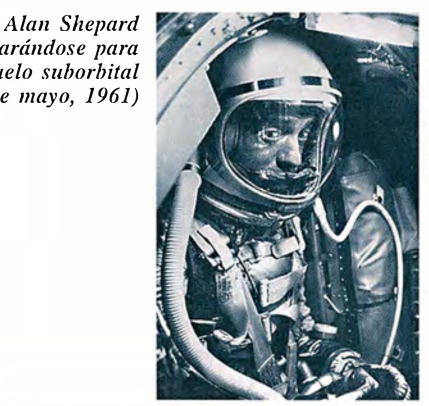
Para desgracia del programa soviético, a comienzos de los años sesenta Korolef se enzarzó en un conflicto personal y organizativo con Valentin P. Gluszko, director del Laboratorio de Dinámica de Gases y principal diseñador de los motores de los cohetes. La mutua animosidad se remontaba a los años treinta, cuando el testimonio de Gluszko contribuyó a que Korolef fuera enviado a un campo de trabajos forzados. Discrepaban sobre cómo deberían ser los motores propulsores de la siguiente generación de cohetes espaciales:



Wernher von Braun



John Kennedy notificando al Congreso los planes para llegar a la Luna (25 de mayo, 1961)



Alan Shepard preparándose para el vuelo suborbital (5 de mayo, 1961)



John Glenn introduciéndose en la cápsula Mercury *(20 de febrero, 1962)*



Yuri Gagarin a punto de ser lanzado a la órbita terrestre (12 de abril de 1961)



Gagarin (centro) *celebra su éxito con Nikita Jruschef* (izquierda) *y Leónidas Breznief (1 de mayo, 1961)*

Korolef quería emplear, como combustible, hidrógeno líquido de alta energía (el mismo que se eligió en los EE.UU. para las fases superiores del *Saturno V*). Gluszko sólo se interesaba en motores alimentados por compuestos hipergólicos, almacenables aunque muy tóxicos: hidracina y tetraóxido de nitrógeno, que se encendían por contacto.

La disputa se fue haciendo tan áspera que Gluszko se negó a colaborar con Korolef en la creación de un nuevo cohete. Y alió su laboratorio con la oficina de proyectos dirigida por Vladimir N. Chelomei, para competir por la adjudicación del programa lunar. El grupo de Chelomei había desarrollado misiles militares, pero carecía de experiencia en cohetes espaciales. Por otra parte, uno de los adjuntos de Chelomei era Sergei, hijo de Jruschef. Este vínculo familiar significaba una gran ventaja en un sistema en el que los lazos familiares eran muchas veces lo decisivo. Chelomei ambicionaba expandir los trabajos de su oficina, invadiendo el territorio de Korolef.

Cuando se trataba de problemas técnicos de importancia, como lo era el de la exploración espacial, los dirigentes de la URSS consultaban a la Academia de Ciencias. Mstislaf V. Keldysh, su presidente, recibió el encargo de asesorar al gobierno sobre los méritos técnicos de las propuestas que competían por la adjudicación de las futuras obras espaciales. Keldysh y sus colegas optaron por seguir la ley del mínimo compromiso y no dieron pleno apoyo ni a Korolef ni a sus competidores hasta después de haber sido apartado Jruschef del poder.

Desde finales de 1961, la oficina de proyectos de Chelomei dedicó su mayor atención a las misiones tripuladas en torno a la Tierra sin entrar siquiera en órbita lunar. Para ello se utilizaría un cohete UR-500 (conocido luego como *Protón*), derivado de uno de los fallidos diseños de Chelomei de misil balístico intercontinental (ICBM). Chelomei promovió también un plan extraordinariamente ambicioso para construir un cohete-avión reutilizable que pudiese llegar a la Luna e inclusive a los planetas del sistema solar.

En agosto de 1964 la oficina de Chelomei recibió la aprobación del Kremlin para construir un satélite y el cohete UR-500, que debía enviar una misión circunlunar tripulada por octubre de 1967, quincuagésimo aniversario de la Revolución Bolchevique. Pero la aparente victoria de Chelomei sobre Korolef duró poco. El Politburó apartó a Jruschef del poder en octubre de 1964.

Los jerarcas que relevaron a Jruschef no tardaron en descubrir el escaso progreso de la organización que había estado recibiendo la parte del león de los fondos asignados a la misión lunar. La oficina de Chelomei cayó pronto en desgracia y su contrato para el programa circunlunar fue cancelado.

Korolef, entre tanto, no había quedado del todo excluido del programa espacial. Tras su éxito en el aprovechamiento de un ICBM modificado para acometer las primeras incursiones espaciales soviéticas, había estado diseñando un nuevo sistema lanzador de cargas pesadas: el N-1. A mediados de 1961 la comisión Keldysh autorizó el desarrollo de una versión del N-1 capaz de poner en órbita terrestre una cápsula de 75 toneladas de peso, pero la comisión no aprobó el plan de Korolef de utilizar el N-1 para una misión lunar estructurada en torno a encuentros en órbita terrestre.

Se supuso que las pruebas de vuelo del cohete N-1 podrían efectuarse hacia 1965. Como no tenía acceso a la experiencia atesorada por el Laboratorio de Dinámica de Gases que dirigía Gluszko, hubo de hallar Korolef otra fuente de energía para los motores de sus cohetes. Recurrió a la oficina de diseño dirigida por Nikolai D. Kuznetsof, que había trabajado en motores de avión. El equipo de Kuznetsof había iniciado sus in-

1962-1967, ESTADOS UNIDOS

Tras una tensa disputa entre Jerome Weisner, asesor del presidente, y la NASA, la agencia espacial concluyó, en 1962, su plan para el proyecto lunar Apolo. Bajo la guía de James Webb, gerente de la NASA, y con el firme respaldo presidencial, la misión Apolo progresó rápidamente, aunque los soviéticos iban por delante en hazañas como la del paseo espacial. La NASA sufrió un duro golpe en 1967, cuando perecieron tres astronautas al incendiarse la cabina del *Apolo* durante la cuenta atrás para una prueba de lanzamiento.



James Webb (izquierda) con Lyndon Johnson



Jerome Weisner

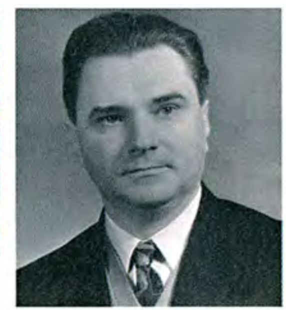
1962-1967, UNION SOVIETICA

Los conflictos personales obstaculizaron el desarrollo del programa lunar soviético. Sergei P. Korolef ideó un cohete gigantesco, el N-1, para transportar cosmonautas a la Luna. El plan de Korolef se demoró por sus peleas con Valentín P. Gluszko. Muerto Korolef en 1966, fue reemplazado por Vasily P. Mishin, que mantuvo vigente el programa N-1. Los proyectos soviéticos sufrieron también desastres técnicos, entre ellos el de un accidentado reingreso en la atmósfera que le costó la vida al tripulante de la nueva nave *Soyuz* en su primera misión.



Sergei Korolef, el "Proyectista Jefe" de los cohetes (a la derecha), conversando con Gagarin

Valentín Gluszko, proyectista de los motores de los cohetes soviéticos



vestigaciones sobre sistemas de propulsión de cohetes casi desde la nada. En el corto tiempo de que dispuso, Kuznetsof sólo consiguió desarrollar un motor que funcionaba con carburante tradicional, de escasa potencia. Para obtener la fuerza ascensional requerida por un lanzamiento hacia la Luna, el N-1 necesitaría 30 motores de aquéllos en su primera fase. (El *Saturno V* norteamericano tenía cinco motores de primera fase.)

Tras la caída de Jruschef, cambió de dirección el programa espacial soviético. Probablemente porque ya no temía la cólera de aquél, por diciembre de 1964 la comisión Keldysh dio su aprobación provisional al plan de alunizaje ideado por Korolef. Esta misión lunar revisada utilizaba un cohete N-1 de nuevo diseño, más potente, y el mismo plan de encuentro en órbita lunar adoptado por la misión Apolo. En mayo de 1965 el gobierno creó el Ministerio de Construcción General de Máquinas para supervisar el programa espacial, que dio prioridad absoluta a la misión lunar ideada por Korolef. El plan oficial exigía que se hiciera un primer intento de alunizaje en 1968, en la esperanza de que la URSS podría aún adelantarse a los EE.UU. en la carrera.

Precisamente cuando el esfuerzo soviético comenzaba a cobrar importancia, sobrevino el desastre. En enero de 1966 murió inesperadamente Korolef durante una sencilla operación quirúrgica. El programa espacial perdía con ello a su más eficaz y carismático líder. El sucesor de Korolef en el cargo, Vasily Mishin, no tenía ni la categoría política de aquél ni su capacidad de dirección. Continuas trifulcas con varios ministerios y con otras oficinas de proyectos fueron frenando los avances. Chelomei seguía propugnando un plan alternativo de alunizaje. Para empeorar las cosas, el reformado propulsor N-1 no alcanzó la potencia suficiente; hubo que perder más tiempo en rediseñarlo.

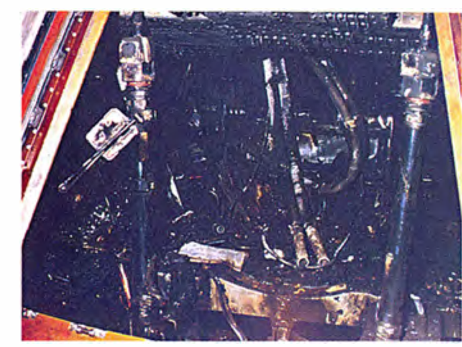
La comisión Keldysh no dio definitiva vía libre al proyecto de alunizaje hasta noviembre de 1966. En febrero siguiente, de un acuerdo conjunto gobierno-partido salió un decreto en apoyo del proyecto, pero el Soviet Supremo le asignó escasos recursos. Por entonces, la fecha señalada para un primer intento de alunizaje se había ya retrasado a la segunda mitad del año 1969.

Los EE.UU. conocían la decisión soviética de seguir adelante con el N-1, pero tardaron varios años en saber para qué tipo de misión se le destinaba. En 1964 los satélites espías estadounidenses observaron la construcción de una plataforma de lanzamiento apta para un enorme cohete nuevo, y en 1967 registraron la construcción de una segunda plataforma de idénticas características. En un informe de marzo de 1967 (liberado del secreto oficial en 1992) la Oficina Central de Inteligencia (CIA) sugirió que "según vean los soviéticos el calendario del Apolo, quizá piensen poder adelantarse en llegar a la Luna y quizás aprieten su programa confiando en conseguirlo".

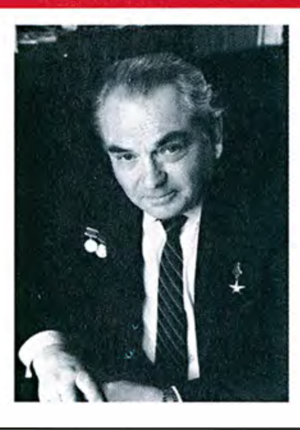
Tras haber lanzado con éxito, en 1965 y 1966, las 10 naves *Gemini* con tripulación de dos hombres, la NASA parecía preparada para, con los vuelos de prueba del Apolo, seguir yendo en cabeza hacia un alunizaje programado para 1968. Pero entonces, el 27 de enero de 1967, un trágico contratiempo frenó el programa: el *Apolo 204* (rebautizado luego en *Apolo 1*) se incendió durante un ensayo de cuenta atrás para el lanzamiento, y perecieron sus tres tripulantes. Pese a las duras críticas recibidas, la NASA no se amilanó. Con una intervención limitada del Congreso y la Casa Blanca, la NASA se hizo cargo en seguida de la investigación y averiguó la causa del incendio. A finales de 1967 la agencia espacial había fijado un nuevo calendario para el Apolo que estipulaba una fecha provisional de alunizaje para mediados de 1969, la misma más o menos que la del programa soviético.



Edward S. White II dando el primer paseo de un norteamericano por el espacio (3 de junio, 1965)



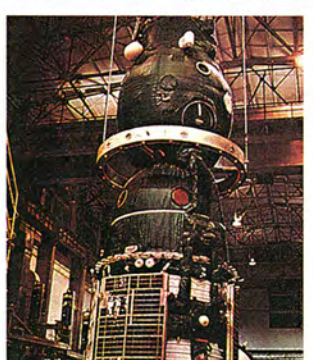
La cabina del Apolo 204 *tras el incendio (27 de enero, 1967)*



Vasily Mishin, sucesor de Korolef



Lanzamiento del UR-500 (Protón)



Soyuz

Los EE.UU. y la URSS tenían trabada también una segunda contienda: la de cuál llegaría antes a las proximidades de la Luna. Concluida la era Jruschef, los nuevos jerarcas Leonid I. Breznief y Alexei N. Kosygin le encargaron a Korolef que preparara una misión circunlunar semejante a la del ya cancelado proyecto Chelomei. Los soviéticos aún esperaban ejecutar esa misión en octubre de 1967. Tras casi un año de tensas negociaciones, Korolef y Chelomei se pusieron por fin de acuerdo, en septiembre de 1965, sobre un plan que utilizaría el propulsor UR-500 de Chelomei, complementado por una fase superior que Korolef estaba desarrollando para el cohete N-1 y una versión de la nave *Soyuz* con dos cosmonautas que se estaba proyectando en la oficina de Korolef.

Aunque los primeros vuelos de prueba del propulsor UR-500, realizados en 1966, fueron satisfactorios, hubo problemas con los lanzamientos siguientes. Además, en abril de 1967, el *Soyuz* falló al aterrizar y pereció el tripulante. Estos contratiempos convirtieron en imposible la misión circunlunar prevista para octubre de 1967. Aun así, las pruebas efectuadas durante 1967 y 1968 posibilitaron el éxito de la misión Zond 5, de septiembre de 1968, en la que el UR-500 lanzó una sonda *Soyuz* modificada con diversas especies a bordo, entre ellas varias tortugas, a un vuelo en el que, después de orbitar la Luna, volvió con todo su cargamento sano y salvo. El vuelo de un cosmonauta soviético alrededor de la Luna parecía inminente.

Por la época de la misión Zond 5, los EE.UU. no se habían oficialmente propuesto llegar a la vecindad de la Luna hasta bien entrado el año 1969. Pero la realidad era bastante diferente. A mediados de 1968, el desarrollo del rediseñado módulo de mando y servicio del *Apolo*, que llevaría a los astronautas en misión circunlunar, tenía fijado como plazo para un primer intento el mes de octubre. Pero la preparación del módulo de alunizaje llevaba meses de retraso. Parecía improbable que el módulo estuviera a punto para su prueba en órbita terrestre antes de febrero o marzo de 1969.

George M. Low, director adjunto del Centro de Vuelos Espaciales Tripulados en Houston, reconocía que el retraso de la prueba del módulo lunar hacía muy posible que los EE.UU. no cumpliesen el plazo fijado por Kennedy. De ahí que, el 9 de agosto de 1968, plantease Low una audaz propuesta: incluir un vuelo adicional en el calendario de lanzamientos del *Apolo*, un vuelo en el que un *Saturno V* pusiese en órbita circunlunar un módulo de mando y servicio con tres tripulantes.

Semejante misión comportaba graves riesgos. Significaba enviar astronautas cerca de la Luna mucho antes de lo proyectado. Tal vuelo sería, además, sólo el segundo del satélite *Apolo* tras las reformas obligadas por el incendio de 1967. Agregábase a ello que el *Saturno V* sólo había sido lanzado dos veces, y su segundo lanzamiento había hecho ver varios problemas graves. Pero el plan de Low le permitiría a la NASA ganar la experiencia de asomarse a la Luna muchos meses antes de lo que estaba planeado. Ese vuelo adicional aumentaría bastante las probabilidades de cumplir los plazos fijados para la misión Apolo. Y también haría más probable que los EE.UU. se acercaran a la Luna antes que lo consiguiera la URSS.

El plan de Low obtuvo una rápida aceptación dentro de la NASA, si exceptuamos la oposición transitoria de Webb y de George Mueller, que dirigía el Programa de Vuelos Espaciales Tripulados. En poco más de una semana la agencia revisó todo su calendario Apolo, creando una misión nueva para cuatro meses antes del lanzamiento previsto. La arriesgada naturaleza de tal vuelo se mantuvo en secreto hasta después de la misión *Apolo 7*, en octubre, en la que

1967-1972, ESTADOS UNIDOS

La NASA no tardó en recuperarse después del incendio del *Apolo*. Pero George M. Low temía que los retrasos impidiesen alunizar a tiempo. A instancias suyas, la NASA modificó su calendario de operaciones. Así, el 24 de diciembre de 1968, en un primer vuelo de prueba, fue puesto en órbita lunar el cohete tripulado *Saturno V* (*Apolo 8*). Luego, el 20 de julio de 1969, se logró el histórico alunizaje del módulo del *Apolo 11*, que puso fin victorioso a la carrera. Siguiéronse otros cinco alunizajes *Apolo*. En 1972, EE.UU. dio por terminado su programa espacial.



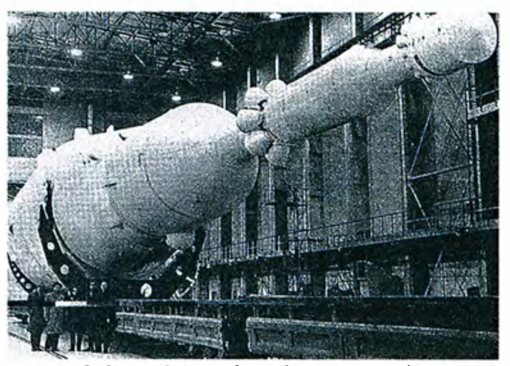
George Low



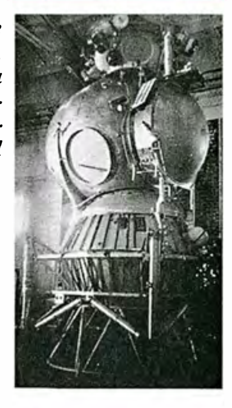
"Orto terrestre" sobre la Luna, en vista tomada desde el Apolo 8 *(24 de diciembre, 1968)*

1967-1974, UNION SOVIETICA

El gigantesco cohete N-1 nunca funcionó bien del todo: en su segundo lanzamiento de prueba explotó destruyendo la plataforma. Gluszko asumió el control del desarrollo del N-1 en 1974. En seguida canceló el programa y desmanteló los cohetes existentes. Hubo piezas del N-1 que fueron ignominiosamente destinadas a servir de barracones de almacenaje. Otras partes del ingenio, entre ellas un módulo lunar y un traje lunar semiflexible, fueron destruidas o expuestas en museos.



Cohete N-1 en fase de preparación para su prueba



Módulo de alunizaje, que habría de acoplarse a la cabeza del N-1

el módulo de mandos y servicios funcionó a la perfección. El 11 de noviembre la NASA autorizaba la misión lunar *Apolo 8*.

Mientras tanto, los soviéticos seguían esforzándose por no perder el ritmo. En octubre de 1968 pusieron en órbita terrestre una *Soyuz* rediseñada y tripulada por un cosmonauta. La misión Zond 6, que un mes después envió en vuelo circunlunar otra sonda similar, aunque sin tripulación, no obtuvo el mismo éxito: la cabina se despresurizó al reentrar en la atmósfera; si hubiese llevado tripulantes, habrían sucumbido.

A pesar de ello, los soviéticos se aprestaron para lanzar, a principios de diciembre, otra nave Zond en vuelo circunlunar, esta vez con dos cosmonautas a bordo. Mishin y la tripulación estuvieron de acuerdo en que había que exponerse a los graves riesgos que la operación implicaba; para entonces sabían ya que los EE.UU. intentaban una misión circunlunar tripulada a finales de ese mes. El lanzamiento quizá les brindara a los soviéticos su última oportunidad de ganarles la carrera a los norteamericanos, pero lo cierto es que no supieron aprovechar tal ventaja. Sólo unos días antes de la fecha fijada para la misión, fue cancelada por el gobierno, presumiblemente por juzgarla demasiado peligrosa.

Durante las últimas semanas de entrenamiento, la tripulación del *Apolo 8* sabía muy bien cuándo podía ser lanzada una nave soviética en misión circunlunar. En conversación con Logsdon, coautor del artículo, el comandante de la expedición, Frank Borman, recordaba que dejó escapar un suspiro de alivio cuando pasó la fecha límite de un posible lanzamiento ruso y sintió que nadie se les habría de anticipar.

El *Apolo 8* entró en órbita lunar en la Nochebuena de 1968, poniendo casi fin a la carrera hacia la Luna. Además, sus logros abrieron el camino a la histórica misión del *Apolo 11* realizada siete meses después, cuando Neil Armstrong hincó la bandera estadounidense en suelo lunar. Tras los triunfos del *Apolo 8* y del *Apolo 11*, el programa lunar de los soviéticos se fue hundiendo en el olvido. Pero su renuncia no fue inmediata. Lanzaron otras dos misiones Zond circunlunares, no tripuladas, una en 1969 y otra en 1970. Poco después, cancelaron su programa circunlunar: estaba claro que el Apolo había ganado la partida.

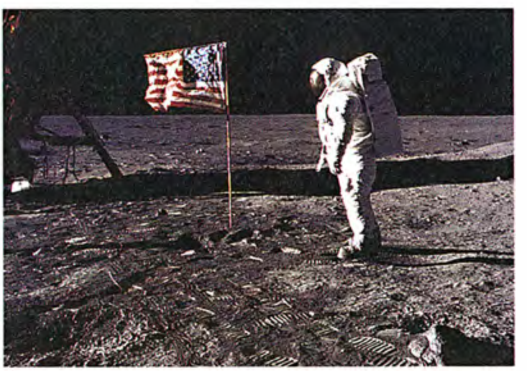
El programa soviético de alunizaje no tuvo fortuna. En febrero de 1969, al primer intento de lanzamiento, el cohete N-1 falló cuando apenas llevaba un minuto en el aire. El segundo intento de lanzamiento, el 3 de julio, sólo 13 días antes del despegue del *Apolo 11*, terminó en una explosión sobre la propia rampa, destruyéndose gran parte de las instalaciones de propulsión en suelo, lo que retrasó por dos años el programa de alunizaje. Otros lanzamientos de N-1 efectuados en julio de 1971 y en noviembre de 1972 fracasaron también.

No siendo los primeros, podían intentar ser los mejores —razonaron en la oficina de diseños de Korolef. Con Mishin a la cabeza, reorganizaron el programa en torno a conseguir largas permanencias sobre la Luna, más dilatadas que las visitas de seis misiones Apolo. A principios de 1974 Mishin creía que él y su equipo habían dado con las causas de los problemas precedentes y que tenían ya el éxito a su alcance. Pero, en mayo de ese año, Mishin fue sustituido en la dirección del departamento de proyectos por Gluszko, el adversario de Korolef a propósito del sistema propulsor de N-1.

Gluszko no tardó en cerrar el programa N-1 y destruir los 10 propulsores que les quedaban. En vano objetó Mishin que al menos se probaran los dos N-1 que estaban a punto. En vez de proseguir con el programa lunar al que se habían destinado cuantiosos recursos a lo largo de más de una década, Gluszko y sus superiores optaron por la respuesta, casi patológica, de destruir las pruebas de que



Tripulación del Apolo 11 *(mayo de 1969)*



Neil Armstrong en suelo lunar (20 de julio, 1969)

DE 1975 A HOY

En 1975 los EE.UU. y la URSS concertaron y llevaron a cabo el encuentro de dos sondas, una *Soyuz* y una *Apolo*. Este acontecimiento sentó el precedente para combinar la mayoría de los planes y actividades estadounidenses y rusos relativos a misiones tripuladas, con el fin de que, hacia el año 2002, pudiera instalarse una estación espacial internacional. Ese logro abriría el nuevo capítulo de una exploración del espacio.



Traje espacial soviético para ir a la Luna





Piezas del N-1 utilizadas como barracones de almacén



Astronauta y cosmonauta a bordo en la misión Apolo-Soyuz *(17 de julio, 1975)*

hubiese existido. Y así, desde comienzos de los setenta, el programa de vuelos espaciales tripulados se concentraría en misiones de larga duración por órbitas terrestres.

Una vez quedó establecida la presencia norteamericana en la Luna, el programa lunar fue perdiendo interés. La sexta y última misión *Apolo* abandonó el suelo de la Luna en diciembre de 1972. Se habían cumplido los plazos señalados en 1961.

¿Mereció la pena ganar la carrera? Para responder a la pregunta hemos de conocer las circunstancias en que se dio la competición. La carrera a la Luna fue un episodio de la guerra fría que debe valorarse ante todo en términos de política exterior. En este dominio fue una victoria importante. El programa Apolo contribuyó a que los EE.UU. procuraran durante los años sesenta hacerse con el liderazgo político y militar del mundo entero. La hazaña de pisar el suelo lunar constituyó una convincente demostración de la resolución del país y de su capacidad tecnológica.

Por su parte, el fracaso del programa lunar soviético supuso más que una derrota de su propaganda y de sus relaciones públicas. En 1961, al iniciarse la carrera a la Luna, mucha gente en los EE.UU. (y en todo el mundo) pensaba que el sistema soviético de planificación y gobierno centralizados permitiría a la nación seguir realizando con vigor sus planes espaciales de largo alcance. El desvanecimiento de la supremacía de la Unión Soviética en el espacio durante los sesenta deslustró la imagen de la competencia socialista y aminoró el peso de los soviéticos en los asuntos mundiales.

En su breve presidencia, Kennedy se mostró siempre ambiguo en cuanto a los aspectos competitivos de la carrera espacial. En su discurso de toma de posesión sugirió a la Unión Soviética que "deberíamos explorar las estrellas juntos". Poco después de haber prestado juramento solicitó a la NASA y al Departamento de Estado propuestas para estrechar la colaboración entre los EE.UU. y la URSS en la conquista del espacio. Esas propuestas llegaron a la Casa Blanca el día en que Gagarin inició su vuelo orbital, acontecimiento que le convenció a Kennedy de que los EE.UU. tenían que hacerse con el liderazgo en el espacio. No obstante, el 20 de septiembre de 1963, en una alocución a la Asamblea General de las Naciones Unidas, todavía preguntó: "¿Por qué la primera misión del hombre a la Luna ha de ser materia de competición nacional?"

El sueño de Kennedy de una cooperación entre las dos superpotencias está a punto de convertirse en realidad. El 15 de diciembre del año pasado, Al Gore, vicepresidente de la nación, y Daniel S. Goldin, administrador de la NASA, firmaron acuerdos con sus equivalentes rusos sobre actividades espaciales conjuntas. Esta colaboración culminará con el establecimiento de una estación espacial internacional, en cuya financiación participarán, además, Europa, Japón y Canadá.

A lo largo de 30 años, la rivalidad de la guerra fría fue de vital importancia para los programas de vuelos espaciales tripulados. Para que la aventura exploradora del cosmos continúe el siglo que viene, se necesitará una amplia cooperación.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

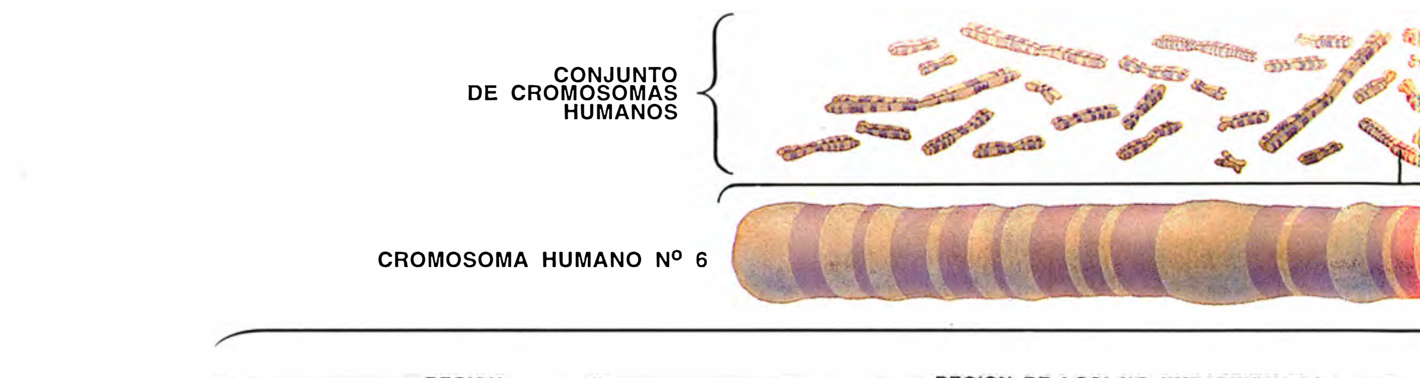
APOLLO: THE RACE TO THE MOON. Charles A. Murray y Catherine Bly Cox. Simon & Schuster, 1989.

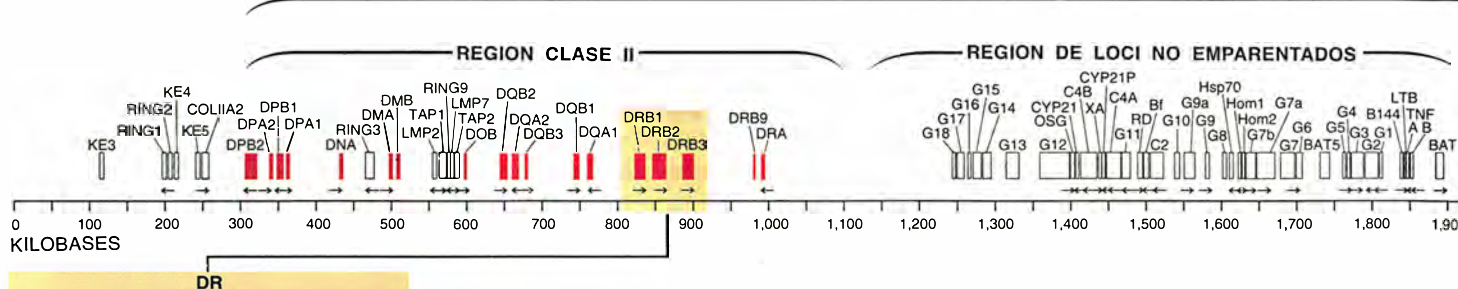
L'ASTRONAUTIQUE SOVIETIQUE. Christian Lardier. Armand Colin, París, 1992.

POURQUOI NOUS NE SOMMES PAS ALLÉS SUR LA LUNE? V.-P. Michine (con M. Pouliquen). Cépaduès Ed., Toulouse, 1993.

SPACEFLIGHT. (Publicación periódica de la British Interplanetary Society). 27-29 South Lambeth Road, Londres, SW 8 1SZ.

QUEST. (Revista trimestral sobre la historia de los vuelos espaciales). P. O. Box 9331, Grand Rapids, MI 49509.





DR

INACTIVO

B1	B2	B3
DRB1*0101		DRB3*0101
DRB1*0102		DRB3*0201
DRB1*0103		DRB3*0202
DRB1*1501		DRB3*0301
DRB1*1502		
DRB1*1503		
DRB1*1601		
DRB1*1602		
DRB1*0301		
DRB1*0302		
DRB1*0303		
DRB1*0401		
DRB1*0402		
DRB1*0403		
DRB1*0404		
DRB1*0405		
DRB1*0406		
DRB1*0407		
DRB1*0408		
DRB1*0409		
DRB1*0410		
DRB1*0411		
DRB1*0412		
DRB1*11011		
DRB1*11012		
DRB1*1102		
DRB1*1103		
DRB1*11041		
DRB1*11042		
DRB1*1105		
DRB1*1201		
DRB1*1202		
DRB1*1301		
DRB1*1302		
DRB1*1303		
DRB1*1304		
DRB1*1305		
DRB1*1306		
DRB1*1401		
DRB1*1402		
DRB1*1403		
DRB1*1404		
DRB1*1405		
DRB1*1406		
DRB1*1407		
DRB1*1408		
DRB1*1409		
DRB1*1410		
DRB1*0701		
DRB1*0702		
DRB1*0801		
DRB1*08021		
DRB1*08022		
DRB1*08031		
DRB1*08032		
DRB1*0804		
DRB1*09011		
DRB1*09012		
DRB1*1001		

LOCI CLASE I A

LOCI CLASE II A Y B

El complejo principal de histocompatibilidad (MHC) es la parte más variable del genoma. En el hombre se denomina HLA y se aloja en el cromosoma 6 (*arriba*). En el mapa molecular (centro), cada rectángulo representa un locus. Los colores indican agrupaciones funcionales: los genes de la clase I son verdes y los de la clase II rojos. Se enumeran los alelos conocidos de tres loci que se han seleccionado (*este recuadro*); para designar cada gen, se han utilizado símbolos formados por el nombre del locus (así, HLA-DBR1) seguido del número correspondiente al alelo marcado con un asterisco (por ejemplo, *0101).

Polimorfismo del MHC y origen del hombre

La diversidad de tipos hísticos humanos se generó mucho antes de que apareciese Homo sapiens

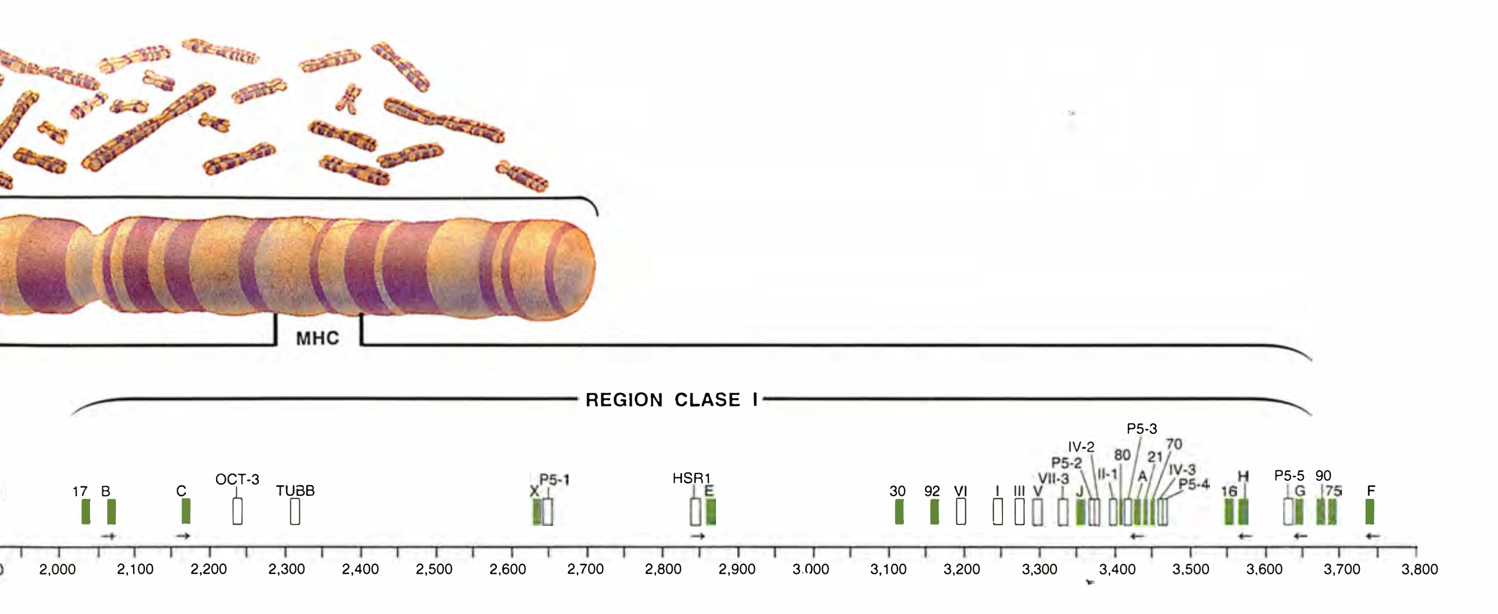
Jan Klein, Naoyuki Takahata y Francisco J. Ayala

¿Desciende la especie humana de unos pocos individuos, de una sola mujer quizá? ¿Surgió de un grupo numeroso, de más de diez mil miembros? De acuerdo con ciertos trabajos, nuestra especie y otras habríanse originado en poblaciones ancestrales pequeñas. No es eso lo que se deduce, sin embargo, de la investigación sobre la evolución de los genes que controlan la capacidad del sistema inmunitario para reconocer las proteínas foráneas. Para entender la cuestión conviene hacer un repaso del sistema inmunitario, sus métodos de reconocimiento de los invasores y los genes que lo controlan.

La historia comienza hace más de medio siglo, cuando Peter A. Gorer descubrió que todos los organismos lucen en la superficie de la mayoría de sus células unos marcadores moleculares por los que se distinguen unos individuos de otros, dentro de la misma especie. Puesto que determinan la compatibilidad hística, esto es, la capacidad de aceptar un trasplante de origen ajeno, se denominaron moléculas de histocompatibilidad. Gorer demostró más tarde que, entre las moléculas de histocompatibilidad, había cierta clase que desempeñaba un papel destacado en la compatibilidad. Las moléculas de la clase en cuestión están especificadas por un largo grupo de loci genéticos que ocupan una región de un cromosoma: el complejo principal de histocompatibilidad (MHC).

Sabemos hoy que la función fisiológica de las moléculas de MHC estriba en iniciar una respuesta inmunitaria contra los parásitos. Durante su síntesis celular, esas moléculas se unen a péptidos pequeños, que quedan así expuestos sobre la superficie. La mayoría de tales péptidos deriva de las proteínas propias del organismo (autopéptidos); pero cuando el cuerpo es infectado por un parásito, las moléculas de MHC que se están ensamblando recogen también péptidos derivados de las proteínas fragmentadas del invasor (péptidos ajenos).

Ciertos linfocitos, las células *T*, rastrean continuamente la superficie de otras células; dejan de lado las que exhiben péptidos propios en la región MHC y se unen a las que presentan péptidos ajenos. Las células *T*



logran distinguirlas porque poseen receptores que son complementarios a la combinación de moléculas MHC propias y péptidos ajenos. Los receptores de la célula *T* reconocen esos complejos; el reconocimiento activa a los linfocitos, que así ponen en marcha una compleja serie de mecanismos encaminados a la destrucción de la célula invadida y del propio invasor. En el caso de un tejido trasplantado, las células *T* reconocen como extrañas las moléculas de MHC del donante, diferentes de las del receptor: el ataque inmunitario se dirige contra el trasplante.

El MHC humano, denominado complejo antigénico linfocitario humano (HLA), contiene más de 100 genes y ocupa una región cromosómica de más de 4 millones de pares de bases. Sólo algunos de esos genes cifran moléculas que participan en la presentación de los péptidos a los linfocitos *T*. Otros genes controlan la degradación de proteínas en péptidos y el transporte de éstos a través de las membranas; genes hay que especifican otros componentes del sistema inmunitario; ciertos genes desempeñan funciones desconocidas o no relacionadas con la respuesta inmunitaria, y, por último, existen genes que no son funcionales.

Los genes MHC pertenecen a dos clases, la I y la II, que se distinguen en su estructura y función. Aquí nos centraremos en el DRB1, gen funcional de la clase II, que se encuentra en humanos y otros primates. Ahora bien, las conclusiones a las que se llega mediante el análisis de los genes DRB1 suelen ser de aplicación para otros genes MHC funcionales.

El rechazo invariable de los trasplantes procedentes de donantes no emparentados sugiere que todos expresamos moléculas MHC distintas. La secuenciación de los genes MHC revela que cada locus MHC funcional puede estar ocupado por uno de entre muchos alelos distintos. (Un *locus* puede compararse con la ventanita de la fecha que portan los relojes calendario: los alelos serían las fechas.) Al haber en un cromosoma varios loci MHC funcionales, y cada locus presentar múltiples alelos, las combinaciones posibles son muchísimas (por lo menos 10^{12}).

Sólo una fracción de las combinaciones posibles se materializan en la población humana. Pero incluso esa fracción resulta lo bastante grande para asegurar que ningún par de individuos no emparentados, elegidos al azar, tenga los mismos alelos MHC en todos sus loci MHC. Esta situación contrasta con la de otros sistemas genéticos en los que cada locus exhibe un solo alelo, o muy pocos, y de éstos uno es frecuente y los otros son raros. Recibe el nombre de polimorfismo la existencia de múltiples alelos en un locus, cada uno de los cuales aparece a una frecuencia apreciable en la población.

Amén del número altísimo de alelos, el polimorfismo del MHC comporta una segunda característica extraordinaria: la gran diversidad de la secuencia de nucleótidos de los diferentes alelos MHC. En otros sistemas genéticos, los alelos de un determinado locus difieren, a lo sumo, en unas pocas sustituciones de nucleótidos. En el sistema MHC, unos alelos divergen de otros en 100 o más sustituciones.

Vengamos a la especiación, proceso mediante el cual una especie parental origina especies hijas. Si fuera verdad que las nuevas especies se originan a partir de un número pequeño de individuos fundadores o, en el caso extremo, de una sola hembra preñada, los polimorfismos se crearían de nuevo tras cada proceso de especiación. En otras palabras, el polimorfismo sería más joven que la especie. Para comprender el motivo, imaginemos una bolsa con 20.000 canicas de 40 colores diferentes, representados todos por igual. Si sacamos de la bolsa 100 canicas al azar, la probabilidad de que esa muestra contenga los 40 colores es muy baja; para ser exactos, de 0,02.

La teoría de la coalescencia de la genética de poblaciones ofrece un argumento más preciso a favor de la relativa juventud del polimorfismo. Los genes tienen su "libro de familia". En teoría, puede seguirse la genealogía de dos genes neutros cualesquiera, elegidos al azar, desde una población actual hasta su confluencia en un único gen ancestral. (Se dice que un gen es "neutro" cuando no confiere ventaja selectiva en comparación con otros genes.) El número medio de generaciones que es necesario remontar hasta llegar al gen coalescente es igual al doble del tamaño eficaz de la población; vale decir: el doble más o menos del número de individuos reproductores. Por consiguiente, suponiendo un tamaño de población eficaz en el pasado de 10.000 individuos y un tiempo medio de generación de 20 años, el tiempo medio de coalescencia para dos

JAN KLEIN, NAOYUKI TAKAHATA y FRANCISCO J. AYALA estudian aspectos complementarios de los sistemas genéticos. Klein, experto en el polimorfismo del MHC, dirige la división de inmunogenética del Instituto Max Planck de Tubinga. Takahata, genético de poblaciones, enseña en la Universidad de Yokohama. Ayala, que investiga el origen de las especies, es profesor de la Universidad de California en Irvine.

genes neutros presentes en la población humana actual es de 400.000 años. Dado que se supone que el *Homo sapiens* arcaico apareció hace unos 500.000 años, la mayor parte del polimorfismo de la especie humana debe haberse generado desde entonces.

Si esta conclusión se aplicara también a los genes MHC, habría que proponer para ellos una tasa de mutación mucho mayor que la de otros genes. Sólo de esa manera podrían haber acumulado, durante el mismo tiempo, un polimorfismo tan extenso. Hace unos 15 años, ésta era la teoría aceptada para explicar el polimorfismo del MHC. Para Klein, coautor del artículo, tal consenso no parecía, sin embargo, acomodarse a las observaciones.

A finales de los setenta, Bernhard Arden, Edward K. Wakeland y Klein encontraron alelos MHC idénticos en dos especies de ratón que habrían tomado rutas distintas hace unos dos millones de años. El hallazgo, inesperado en especies cuya diversidad del MHC es, cuando menos, similar a la del hombre, implica que los genes MHC no evolucionan más deprisa que otros.

En 1980, Klein propuso que la gran diversidad nucleotídica de los alelos MHC no se debía a una elevada tasa de mutación, sino a la transmisión generalizada del polimorfismo MHC de las especies parentales a las hijas. De acuerdo con esta hipótesis, la mayoría de los alelos MHC se transmite durante los períodos de especiación, igual que las joyas de una familia pasan de generación en generación. Por tanto, el tiempo medio de coalescencia de los alelos MHC puede resultar mucho más dilatado que la esperanza de vida de una especie.

Las primeras pruebas directas que respaldaban la hipótesis de la transmisión transespecífica aparecieron en 1988, con la comparación entre secuencias de alelos MHC de especies emparentadas. Klein, Felipe Figueroa y Eberhardt Günther demostraron la existencia de alelos que habían iniciado andaduras distintas antes de la separación de la línea evolutiva que originó al ratón doméstico y la rata noruega, acontecimiento que ocurrió, según se fecha ahora, hace más de 10 millones de años. También se han encontrado pruebas de la antigüedad de los alelos MHC de roedores y primates en los laboratorios de Wakeland, Werner E. Mayer, Peter Parham, Henry A. Erlich, Ronald E. Bontrop y otros.

Un ejemplo de polimorfismo transespecífico lo proporcionan dos alelos humanos del locus DRB1, que difieren más entre sí que con los correspondientes alelos del chimpancé. Las relaciones pueden medirse en términos de distancia genética, o número de sustituciones de nucleótidos dividido por el número de sitios que se comparan. Puede construirse así un árbol genealógico de los cuatro alelos en el que esas distancias son proporcionales a la longitud de las ramas y en el que los genes separados por las distancias más cortas están próximos.

Del árbol se desprende que los dos genes humanos divergieron de un gen ancestral común antes de que se separaran los antepasados del hombre y del chimpancé, hace más de 4 millones de años. Klein, Figueroa y Colm O'hUigin obtuvieron pruebas de la divergencia de otros alelos MHC humanos antes de la bifurcación de prosimios y primates antropoides, hace más de 65 millones de años. Durante ese período tuvieron que darse muchos episodios de especiación y el polimorfismo MHC debió transmitirse a través de todos ellos.

La antigüedad de los linajes alélicos MHC contradice la conclusión de la teoría de la coalescencia, según la cual todos los alelos humanos se remontan no más de 400.000 años. Takahata, coautor del artículo, sugirió en 1990 que el problema radicaba en la principal premisa de la teoría, esto es, que los genes en cuestión no son neutros sino que están sujetos a una selección equilibradora, forma de selección que mantiene dos o más alelos en una población mucho más tiempo de lo que cabría esperar si se hallaran expuestos a un proceso de deriva aleatoria. Generalizando la teoría a genes sometidos a selección, Takahata demostró que el tiempo de coalescencia variaba en proporción con la intensidad de la selección: cuanto más fuerte es ésta, más tardan dos linajes génicos en coalescer. Según sus cálculos, los tiempos medios de coalescencia son de muchos millones de años.



1. LA RESPUESTA INMUNITARIA comienza cuando una molécula MHC (*gris*) que se está sintetizando en la célula se une con un péptido (*rojo*). El complejo así formado se desplaza hacia la superficie celular, donde queda expuesto a los linfocitos *T*. Estos desprecian el complejo si el péptido procede de una proteína del propio organismo, pero se traban con él cuando es de origen foráneo. La unión activa al linfocito.

Austin L. Hughes y Masatoshi Nei han aportado pruebas indirectas de que los genes MHC funcionales están sometidos a una selección equilibradora. Distinguen ellos entre sustituciones de nucleótidos que no cambian la identidad de los aminoácidos (sinónimas) y sustituciones que sí lo hacen (no sinónimas). Como las mutaciones afectan por igual a ambos sitios, la relación entre los dos tipos de sustituciones, a la que llamaremos parámetro gamma, será igual a uno, siempre que hablemos de sustituciones neutras desde el punto de vista de la selección.

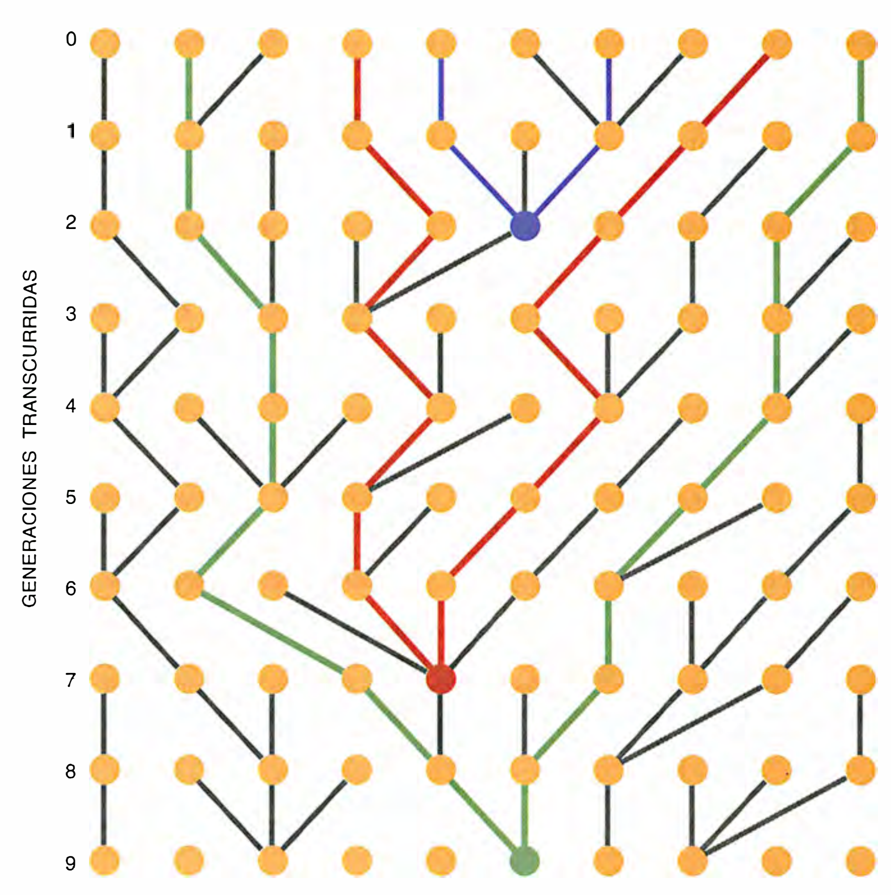
Las sustituciones sinónimas suelen ser neutras, pero las no sinónimas pueden conferir alguna ventaja y traducirse en una selección "positiva", que origina un valor de gamma mayor que uno. En opción alternativa, podrían conferir una desventaja y provocar una "selección negativa", que rebaja el valor de gamma a menos de uno. Por consiguiente, el parámetro gamma revela la existencia de selección.

Hughes y Nei dividieron el gen

MHC en dos partes: la que cifra los aminoácidos comprometidos en la unión con el péptido (región PBR) y el resto del gen (región no PBR). Descubrieron que, en los genes MHC funcionales, los valores de gamma de los fragmentos PBR eran superiores a uno e, inferiores, los correspondientes a los fragmentos no PBR. Dedujeron que la selección favorece el reemplazamiento de aminoácidos en la PBR (donde se concentra la mayor parte del polimorfismo del MHC) y labora en contra en el resto del gen.

En 1991, el equipo oxoniense de Adrian U. S. Hill presentó pruebas experimentales directas de selección positiva en los genes MHC, al demostrar que ciertos alelos MHC humanos intervenían en la defensa contra *Plasmodium falciparum*, parásito responsable del paludismo. El PBR de la molécula MHC está sometido, por tanto, a una presión selectiva para diversificarse, con probable finalidad protectora contra la amplia gama de parásitos que amenazan a los vertebrados. La selección es responsable del mantenimiento de los linajes alélicos MHC en las poblaciones durante períodos largos, permitiendo así que los alelos pasen de las especies parentales a las hijas.

Puesto que la evolución de la diversidad MHC depende del número de individuos reproductores, debe aceptarse cierto tamaño de población para extraer conclusiones sobre la persistencia de los alelos. Lo cierto es que desconocemos la magnitud de la población humana en el pasado, en particular cuándo se individualizó nuestra especie.



2. MODELO DE COALESCENCIA que permite trazar los linajes evolutivos de los genes (*líneas de color*) hasta sus antepasados comunes. Este diagrama representa una población de cinco individuos, cada uno portador de dos genes (*círculos*). En ausencia de selección, el número calculado de generaciones (*flechas*) que separan una pareja de genes emparentados sería de 10, o el doble del tamaño eficaz de la población. Por tratarse de una población pequeña, la influencia del azar será grande, lo mismo que la variabilidad de los cálculos.

Suelen proponerse poblaciones fundadoras pequeñas en el arranque de las especies; y de hecho permiten explicar el origen de las especies isleñas. Ahora bien, en términos generales, carecemos de información directa sobre el tamaño de las poblaciones fundadoras. Pero el polimorfismo MHC ofrece la posibilidad de estudiar indirectamente la especiación: si se conociera el número de alelos MHC que una especie ha heredado de su antecesora (así como la tasa de mutación y la intensidad de la selección) podría calcularse el tamaño de la población fundadora.

Supongamos que hemos encontrado cierto número de alelos MHC en una población de un tamaño determinado. Si pudiésemos reconstruir la genealogía de los alelos, observaríamos primero la coalescencia de dos de ellos, a continuación la de otros dos, y así sucesivamente hasta que todos los alelos actuales convergieran en un antepasado común. Imaginemos que acaba de ocurrir una de esas coalescencias y estamos aguardando la siguiente. El tiempo de espera se convierte en una variable aleatoria que, en teoría, puede adoptar cualquier valor desde cero hasta infinito. Pero la realidad es que ciertos tiempos de espera son más probables que otros, probabilidad que puede calcularse a partir del tamaño de la población y del número de alelos ancestrales: cuanto mayor sea el número de alelos, más rápida será la coalescencia. A la inversa, si conocemos el tiempo de coalescencia y el número de alelos ancestrales, podemos calcular el tamaño eficaz de la población.

Para obtener los valores del tiempo de coalescencia, se comparan las secuencias nucleotídicas de los alelos MHC de un locus, se calculan las distancias genéticas entre ellos y se representan éstas en un dendrograma. Yoko Satta puso de manifiesto la cadencia temporal de la ramificación en función de una cronología absoluta, al demostrar que las sustituciones sinónimas en los alelos MHC ocurren con regularidad de reloj cuando se consideran períodos largos. Y calibró el cronómetro tomando por referencia el registro fósil.

La tasa calculada por Satta permite averiguar los tiempos de coalescencia de parejas alélicas en un árbol genealógico, así como el número de alelos ancestrales existentes en cualquier momento del pasado. A partir del número conocido de alelos MHC-DRB1 existentes, nosotros calculamos un tamaño eficaz a largo plazo de la población humana, en los últimos 0,5 millones de años, del orden de 100.000 individuos. Los cómputos realizados para otros loci MHC humanos suelen dar valores similares. Y también se indican grandes tamaños de población para otras especies de primates cuyo polimorfismo MHC está bastante bien definido.

Tales cálculos no excluyen, sin embargo, la posibilidad de que la población haya sufrido estragos ocasionales, por epidemias o hambrunas. Esos cataclismos demográficos habrían producido cuellos de botella genéticos, llamados así porque sólo una fracción de los alelos pasa a la si-

guiente fase de la historia evolutiva de la población. Pero no es preciso apelar a desastres. Un pequeño grupo de individuos podría separarse de la población principal, emigrar a una región remota y desarrollarse allí, dando origen a una nueva especie.

El comportamiento de los genes en la fase de cuello de botella, aunque difícil de analizar matemáticamente debido al fuerte efecto de las fluctuaciones aleatorias, puede simularse en un ordenador. Parte éste, por ejemplo, de 100.000 "individuos" que portan 200.000 "genes"; a cada "gen" se le asignan cuarenta "alelos" distintos, de idéntica frecuencia en la población. El ordenador escoge al azar 1000 genes (esto es, 500 individuos), estableciendo así la primera generación "cuello de botella". De esta serie vuelve a escoger 1000 genes (segunda generación), reemplazando cada vez el gen escogido por otro del mismo tipo antes de tomar el siguiente. Al cabo de diez generaciones, la máquina cuenta los alelos que quedan y sus frecuencias. El proceso de simulación se itera cierto número de veces para calcular cuál sería la probabilidad de que todos los alelos pasaran por el cuello de botella.

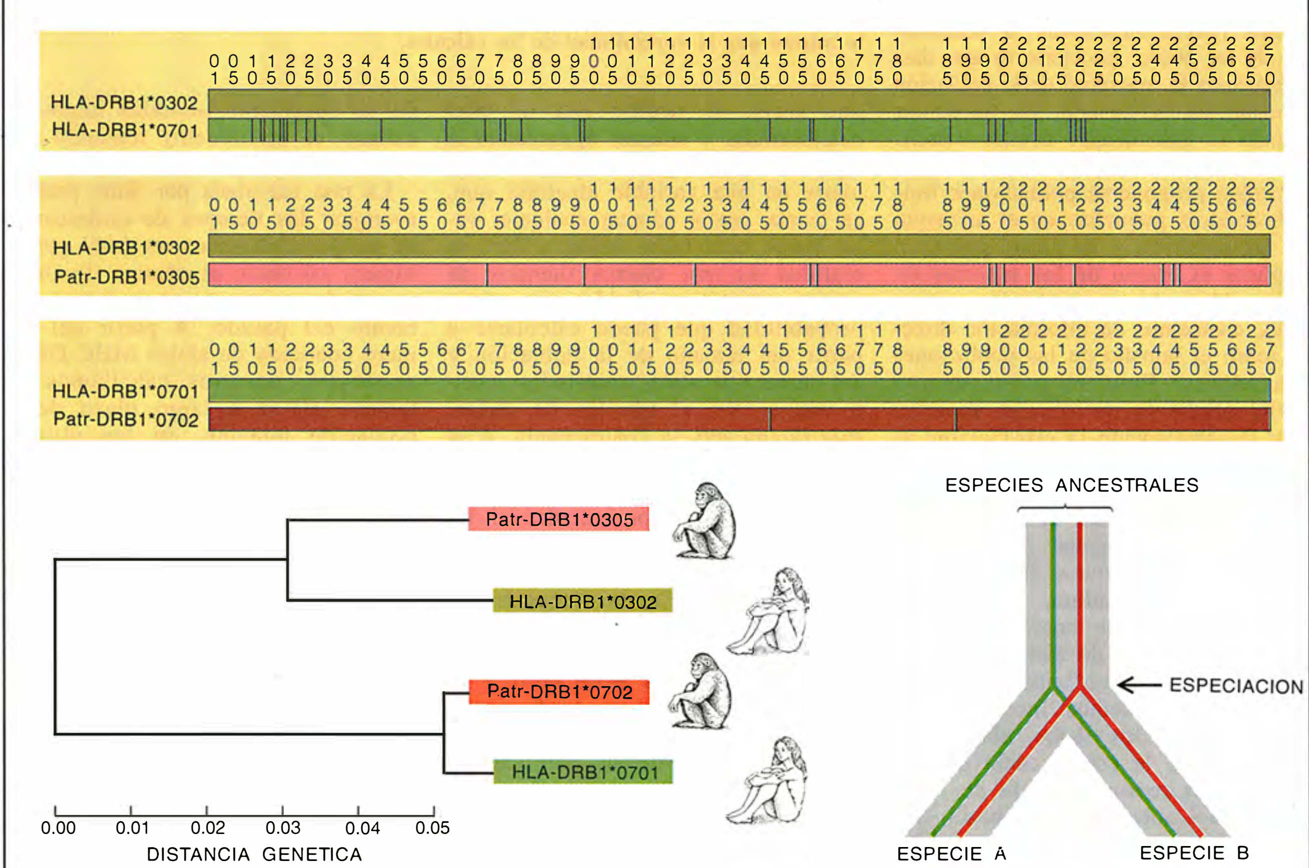
Resulta que los 40 alelos pasan por el cuello de botella en el 60 % de las simulaciones. Si el cuello es mucho más estrecho, o si perdura a lo largo de muchas más generaciones, la probabilidad decae tanto, que no cabe esperar que el polimorfismo se transmita de una especie a otra. En consecuencia, estas simulaciones permiten concluir que la población fundadora de una especie no puede estar formada por menos de 500 individuos reproductores. En la realidad el tamaño mínimo será probablemente mucho mayor, pues se han establecido de intento unas condiciones de simulación que comportan la infravaloración (se consideraron sólo los alelos de un locus y sólo los que diferían en el PBR).

Estos cálculos contradicen la hipótesis extendida de que las especies surgen de poblaciones fundadoras pequeñas, en que las fluctuaciones aleatorias de las frecuencias génicas proporcionan condiciones favorables a un mayor efecto de la selección natural. El polimorfismo MHC excluye rotundamente la posibilidad de que las poblaciones humanas deriven de un solo individuo, de una Eva.

En 1987, el equipo de Rebecca L. Cann publicó los resultados de sus análisis del ADN mitocondrial de varias poblaciones humanas. No se trataba ni del primero ni del último análisis de ese tipo, pero tuvo una enorme resonancia. La expresión "Eva mitocondrial" vino a significar que los humanos modernos tuvieron su origen en un solo individuo. Pero el estudio no demostraba tal cosa. Los autores aseguraban haber establecido que todas las variantes del ADN mitocondrial presentes ahora en la población humana derivan de una mo-

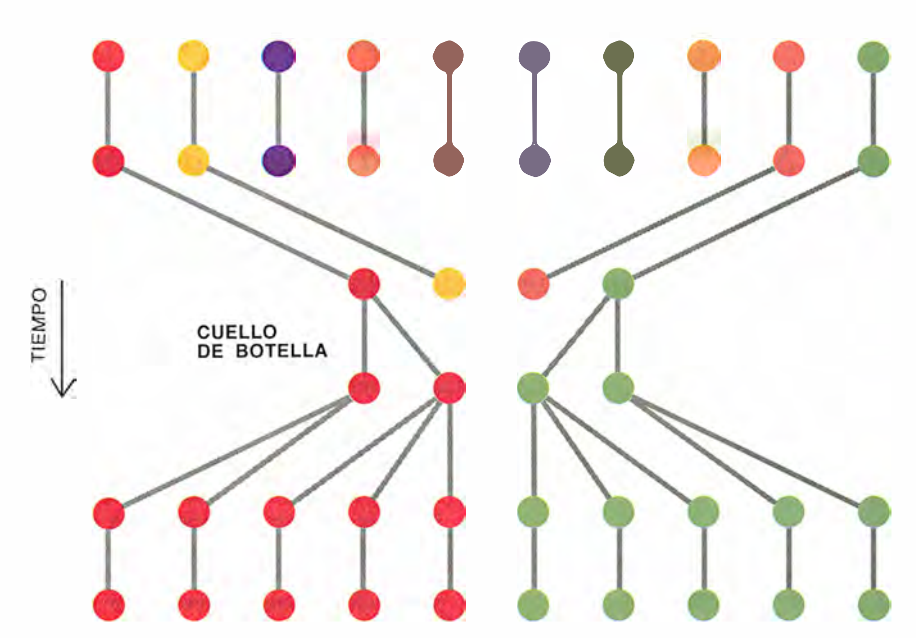
Dendrogramas

En esta comparación de los loci MHC-DRB1 humano (HLA) y del chimpancé (Patr) se patentiza el polimorfismo transespecífico. Se han comparado dos alelos de cada especie; las diferencias entre las secuencias de los alelos humanos son mayores (*líneas verticales, arriba*) que cualquiera de ellos y los del chimpancé. Cuando estas diferencias se convierten en distancias genéticas y se representan en un árbol genealógico (*abajo, izquierda*), el patrón de ramificación revela que los alelos divergieron mucho antes que las especies (*abajo, derecha*).



lécula ancestral presente en una hembra que vivió hace 200.000 años. (Aunque esto también es cuestionado por otros.)

La conclusión de Cann, aunque fuese cierta, no significaría que el árbol genealógico humano comenzara en una madre de hace 200.000 años. Indicaría sólo que los "alelos" del ADN mitocondrial existentes en la actualidad coalescen en una molécula ancestral que hubo entonces. Dado que se hereda en bloque, podemos asimilar el ADN mitocondrial a uno cualquiera de los 40.000 genes humanos; para cada uno de éstos puede trazarse, en teoría, un árbol genealógico, hasta llegar al gen ancestral. Esos genes existieron en momentos distintos del pasado. Los genes MHC, como hemos visto, pueden derivar de antepasados que vivieron hace más de 65 millones de años. La frase "Eva mitocondrial" llevó a mucha gente a pensar en términos de árboles genealógicos de individuos y no en genealogía de genes. Los datos reales de Cann y sus colegas no contradicen los datos del MHC, ni demuestran la existencia de una fase de cuello de botella en la evolución de la especie humana.



3. EFECTO FUNDADOR. Para muchos, constituye la causa del origen de las especies. El efecto fundador debe reflejarse en una notable reducción del polimorfismo. La población simplificada que se representa arriba se reduce a un "cuello de botella" de dos individuos, con cuatro alelos en determinado locus. Estos dos fundadores no pueden transmitir más de cuatro alelos a la siguiente generación y, por consiguiente, a una hipotética nueva especie que pudieran originar. En este caso, la deriva genética durante la fase de "cuello de botella" sólo ha permitido el paso de dos alelos a la nueva especie. Los círculos representan genes y los colores alelos.

Los datos del MHC sugieren que la línea inicial de los homínidos se escindió, llegado cierto momento, en dos poblaciones al menos, una de las cuales condujo al *H. sapiens* moderno. La población que evolucionó en *H. sapiens* constaba por lo menos de 500 (aunque lo más probable serían 10.000) individuos reproductores que portaban casi todos los alelos MHC y los linajes alélicos encontrados hoy día en la población humana. Aunque esa gran población ancestral pudo dividirse en varios grupos menores, éstos prosiguieron relacionándose mutuamente, intercambiando genes y evitando con ello que el gran tesoro del polimorfismo MHC se perdiese por fluctuaciones aleatorias de las frecuencias génicas. El polimorfismo que ahora protege a los humanos contra los parásitos es una herencia que se ha transmitido a través de innumerables generaciones a lo largo de 65 millones de años.

Calcular el tamaño de la población que dio origen a la especie *H. sapiens* es sólo un ejemplo de las aplicaciones del polimorfismo MHC. En el futuro, será posible también estimar el tamaño de las tribus colonizadoras en las oleadas migratorias humanas, como las que se establecieron en el continente americano, Australia, Polinesia y Japón. En términos más generales, el polimorfismo MHC permitirá sin duda sacar conclusiones sobre la naturaleza del propio proceso de especiación. Será posible, por ejemplo, investigar si la mayoría de los cambios evolutivos ocurren por pulsos discontinuos de especiación, como sostienen los partidarios de la teoría del equilibrio puntuado, o si el cambio procede sin solución de continuidad a lo largo de la vida de la especie. También podremos aclarar si las especies surgen como gemaciones de una especie ancestral que sigue existiendo o si cada especiación implica la transformación gradual de una especie en otra.

El polimorfismo MHC ayudará a resolver esos y otros problemas de los organismos que lo portan. Pero el método sirve para otros polimorfismos genéticos. Los sistemas genéticos que gobiernan la autoincompatibilidad en plantas son un claro ejemplo. En muchas plantas con flores, el polen es incapaz de germinar y desarrollarse en el estilo del pistilo, si polen y pistilo expresan el mismo alelo de un locus de autoincompatibilidad. Existen varios alelos de ese locus.

Thomas R. Ioerger, Andrew G. Clark y Teh-Hui Kao han estudiado secuencias nucleotídicas de alelos de tres especies de la familia de las solanáceas: un tabaco ornamental, una petunia silvestre y una patata silvestre. Encontraron que algunos alelos de una especie determinada poseen mayor grado de distinción entre sí que cuando se compara cada uno de ellos por separado con su contrapartida en la otra especie. Llegaron a la conclusión de que algunos linajes alélicos antecedían a la divergencia de las tres especies en unos 27-36 millones de años. Por consiguiente, también en esas especies, las poblaciones fundadoras debieron de haber sido grandes.

Estos descubrimientos, tan similares a los que relacionan los alelos MHC humanos y de chimpancé con un antepasado común, ponen de manifiesto las posibilidades de los estudios comparativos de la diversidad alélica. Al ofrecer la oportunidad de abordar poblaciones que vivieron hace millones de años, todas estas investigaciones deberían sentar las bases de un nuevo campo: la paleogenética de poblaciones.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EVOLUTION OF THE MAJOR HISTOCOMPATIBILITY COMPLEX. Jan Klein y Felipe Figueroa en *CRC Critical Reviews in Immunology*, vol. 6, n.º 4, págs. 295-386, 1986.

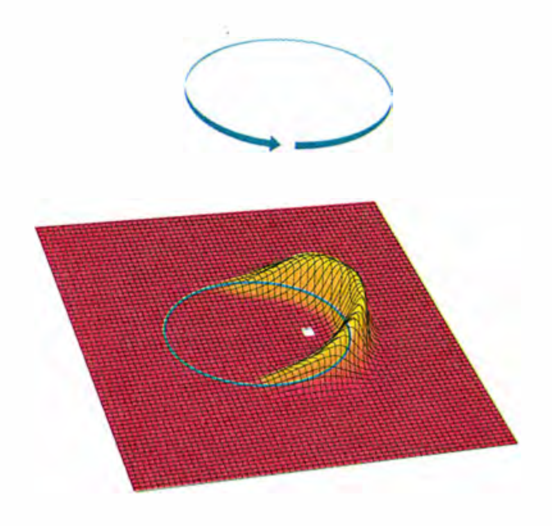
NATURAL HISTORY OF THE MAJOR HISTOCOMPATIBILITY COMPLEX. Jan Klein. John Wiley & Sons, 1986.

A SIMPLE GENEALOGIC STRUCTURE OF STRONGLY BALANCED ALLELIC LINES AND TRANS-SPECIES EVOLUTION OF POLYMORPHISM. Naoyuki Takahata en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 87, n.º 7, págs. 2419-2423; abril de 1990.

El límite clásico del átomo

Se admite que, mediante la creación de átomos de un tamaño notable, podrá estudiarse el paso de la física conceptualista del mundo cuántico a la mecánica clásica de la experiencia cotidiana

Michael Nauenberg, Carlos Stroud y John Yeazell



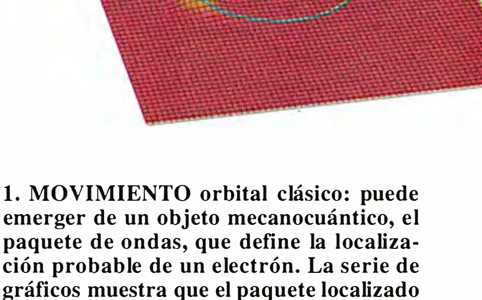
A lo largo de este siglo, los físicos han empleado dos descripciones de la naturaleza muy diferentes. La física clásica explica el movimiento de los objetos macroscópicos —las ruedas, las poleas, los planetas, las galaxias— y describe las relaciones de causa y efecto, continuas y por lo normal predecibles, que se dan en las colisiones de las bolas de billar o entre la Tierra y los satélites que giran a su alrededor. La física cuántica abarca el mundo microscópico de los átomos, las moléculas, los núcleos y las partículas elementales; lo describe con leyes probabilísticas que determinan las transiciones entre los niveles de energía y gobiernan el paso por efecto túnel a través de las barreras de energía. Como la mecánica cuántica es la teoría fundamental de la naturaleza, tendría también que comprender el dominio clásico; es decir, al aplicarla a los fenómenos macroscópicos tendría que alcanzarse un límite donde equivaliera a la mecánica clásica.

Hasta hace poco, sin embargo, no se había elucidado la naturaleza exacta de esa transición. Se han creado sistemas atómicos que obedecen, durante un corto período, las leyes de la mecánica clásica. Para producirlos hay que excitar átomos hasta que se hinchen unas diez mil veces. A tal escala, la posición de los electrones se localiza estrechamente; por lo menos su órbita deja de ser una nebulosa que sólo representa posiciones probables: el electrón traza entonces alrededor del núcleo, como los planetas alrededor del Sol, una elipse.

La importancia que tiene el que se entienda mejor el límite clásico de los átomos adquiere un nuevo significado a la luz de la técnica moderna, que ha difuminado las diferencias entre el mundo macroscópico y el microscópico. Los dos dominios han estado muy separados; un mismo científico emplearía la mecánica clásica para predecir el próximo eclipse lunar y cálculos cuánticos para investigar la desintegración radiactiva. Pero los ingenieros construyen ya de manera rutinaria transistores con dimensiones inferiores a una micra, tamaño comparable al de algunas moléculas. Al mismo tiempo, una nueva generación de microscopios ve, y hasta maneja, átomos sueltos. Los conocimientos que obtengamos gracias al estudio del límite clásico contribuirán a que se halle la mejor manera de explotar estas técnicas.

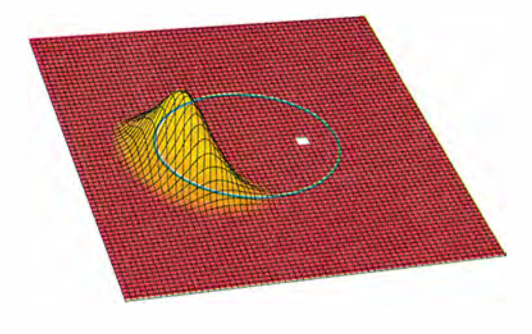
Las profundas diferencias entre el mundo cuántico y el dominio clásico salieron a luz a comienzos de siglo. Los experimentos de Ernest Rutherford establecieron que el átomo consiste en una carga positiva puntual que mantiene sujetos a su alrededor electrones de carga negativa. Para los primeros que la investigaron, esta disposición reproducía la del sistema solar. La fuerza que retiene unidos los electrones al núcleo —la fuerza de Coulomb— varía, como la fuerza gravitatoria, con el inverso del cuadrado de la distancia.

Se demostró que este sencillo modelo planetario no era satisfactorio. Según la teoría electromagnética clásica, toda carga eléctrica que describa una órbita cerrada radiará energía. Por tanto, un electrón que se moviese en una órbita elíptica debería gastar rápidamente su energía y caer en espiral hacia el núcleo. La materia entera sería entonces inestable. Además, la radiación que un electrón emitiría mientras se zambullese en el núcleo tendría un espectro continuo. Los experimentos, sin embargo, indicaban que los electrones emiten la radiación a destellos, lo que produce un espectro de líneas discretas.



1. MOVIMIENTO orbital clásico: puede emerger de un objeto mecanocuántico, el paquete de ondas, que define la localización probable de un electrón. La serie de gráficos muestra que el paquete localizado traza una órbita elíptica alrededor del punto donde se encuentra el núcleo (*cuadro blanco*). El paquete de ondas empieza a dispersarse tras completar una revolución.

Niels Bohr resolvió algunas de estas dificultades complementando la física clásica del modelo planetario del átomo con un conjunto de condiciones basadas en la teoría de la naturaleza de la radiación que concibió Max Planck. Este descubrió que la radiación se emite en forma de unidades discretas (cuya energía depende del parámetro fundamental que ahora lleva el nombre de constante de Planck, *h*). Bohr conservó la idea de las órbitas clásicas, pero supuso que sólo estaban permitidos ciertos valores discretos de la energía y del momento angular. Un entero, el número cuántico principal, caracterizaba cada estado de energía que un electrón podía ocupar mientras estuviese asociado a un núcleo. El estado fundamental o más bajo llevaba el número uno, el primero excitado el dos, y así sucesivamente. Otros números cuánticos describen el momento angular de la partícula, que, según la teoría de Bohr, sólo puede tomar valores que sean múltiplos de la constante fundamental de Planck. Los electrones podían pasar de unas órbitas a otras mediante "saltos cuánticos". Cada salto daba una frecuencia de luz distinta, igual a la diferencia en energía entre las dos órbitas dividida por la constante de Planck. Las frecuencias predichas de esta manera concordaban completamente con el espectro discreto que se había observado en la luz emitida por el hidrógeno.



Bohr postuló, además, una regla que identificaba el límite clásico de su teoría cuántica, el principio de correspondencia. Afirma esa regla que, cuando los números cuánticos son grandes, la teoría cuántica debe confundirse con la mecánica clásica. El límite así definido coincide con los estados de cosas donde la acción clásica es mucho mayor que la constante de Planck. Por eso, es habitual referirse a él como la escala en que se desvanece la constante de Planck. El principio de correspondencia de Bohr sigue siendo la guía básica para llegar al límite clásico de la mecánica cuántica, pero veremos que, aunque necesario para obtener el régimen clásico, no basta.

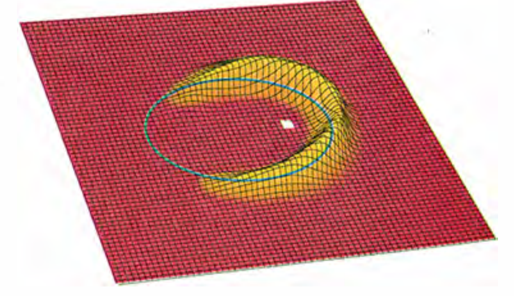
El modelo de Bohr-Rutherford explicó con éxito las características del hidrógeno. Pero en cuanto se aplicó a átomos más complicados y a las propiedades de las moléculas dio lugar a dificultades e incoherencias. Werner Heisenberg conjeturó que, para seguir progresando, la teoría cuántica de los átomos debería basarse sólo en magnitudes directamente observables, como las líneas espectrales que se han mencionado antes. Creía que había que deshacerse por completo de ciertos conceptos de la física clásica, como las órbitas electrónicas a las que Rutherford y Bohr recurrieron. Escribió a Wolfgang Pauli que esas órbitas no tenían ni el menor significado físico. Y, en efecto, en su formulación matricial de la mecánica cuántica prescindió por completo de las órbitas electrónicas. Heisenberg expresó la frecuencia y la magnitud de las líneas espectrales discretas con la constante de Planck y otros valores fundamentales de la naturaleza. Independientemente, Erwin Schrödinger derivó una formulación distinta pero equivalente. Siguiendo las ideas del físico francés Louis de Broglie, representó los sistemas físicos mediante una ecuación de ondas; las soluciones de esta ecuación asignaban probabilidades a los posibles resultados de la evolución del sistema.

Heisenberg pensaba que no había lugar para las órbitas clásicas en la teoría cuántica. Schrödinger era de otra opinión. Desde el principio le interesó la relación entre los mundos microscópico y macroscópico. La dinámica clásica, creía, tenía que emerger de su ecuación de ondas. Como primer paso, investigó un tipo de sistema muy simple, el oscilador armónico. No es exactamente un cuerpo que describe una órbita; corresponde al movimiento arriba y abajo de un bloque que cuelga del extremo de un

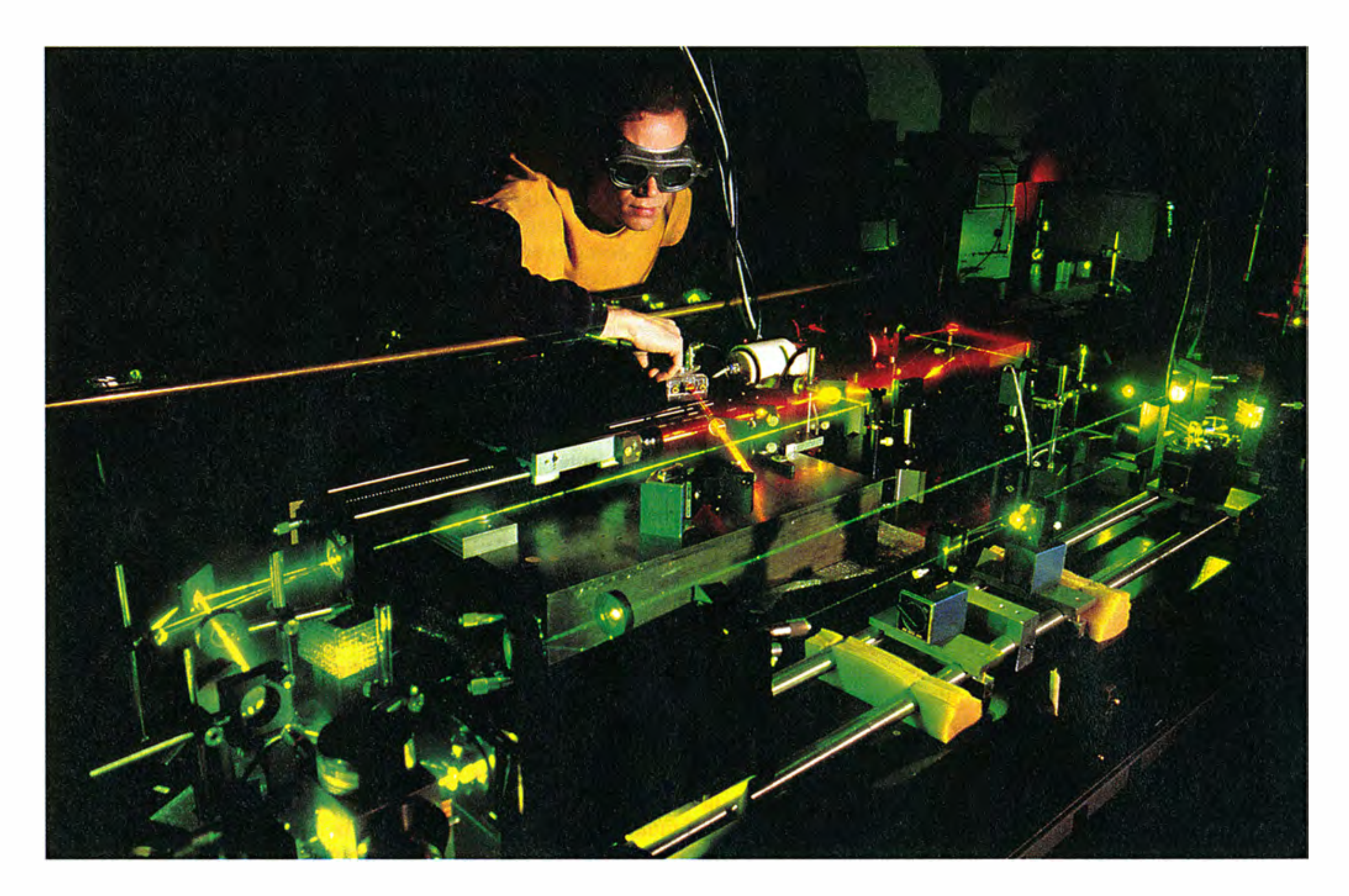
MICHAEL NAUENBERG, CARLOS STROUD y JOHN YEAZELL son expertos en la exploración teórica y experimental del límite clásico del átomo. Nauenberg dirige el instituto de ciencia no lineal de la Universidad de California en Santa Cruz. En la de Rochester enseña óptica Stroud. Yeazell estudia el caos cuántico, es decir, los sistemas cuánticos cuyos análogos clásicos actúan caóticamente.

muelle. El oscilador armónico comparte con las órbitas en un campo coulombiano o gravitatorio una característica crucial: la periodicidad. Un cuerpo en órbita repite su movimiento una vez por ciclo (el período de la órbita de la Tierra es justo un año). El bloque suspendido tiene también un ciclo: completa una acción arriba y abajo en cierta unidad de tiempo.

Schrödinger logró derivar de su teoría el comportamiento clásico del oscilador armónico. Para ello construyó una solución de la ecuación que lleva su nombre sumando otras soluciones que tenían valores discretos de la energía; soluciones que, gráficamente, son ondas sinusoidales con frecuencias diferentes. Al superponer las ondas se producía un "paquete de ondas gaussiano", con aspecto de curva acampanada. El interés de este objeto estaba en una de sus propiedades: la de permanecer localizado alrededor de un centro de movimiento periódico y clásico. Sin embargo, Schrödinger no pudo obtener un movimiento clásico similar en casos más complicados, el de un electrón en un átomo de hidrógeno, por ejemplo.



Pese a ello, no parecería tan difícil formular con paquetes de ondas una descripción clásica de un electrón asociado a un átomo. De manera análoga, se escogerían estados de energía atómica apropiados, se hallarían sus soluciones ondulatorias y se las superpondría. El problema estriba en la manera en que los niveles de energía están separados. Un teorema de Jean-Baptiste



Fourier indica que sólo niveles de energía que estén igualmente espaciados entre sí pueden combinarse para formar un estado coherente que se mueva periódicamente. Pero en un átomo los estados de energía adyacentes no guardan intervalos iguales. Por ejemplo, la energía que separa el estado fundamental del primer estado excitado es extremadamente grande en comparación con los intervalos de energía entre los números cuánticos altos: el primer intervalo es un millón de veces mayor que el hiato que separa los números cuánticos 100 y 101. Un paquete de ondas formado por una superposición de estados cercanos al fundamental se dispersará, pues, al poco de haber sido creado. Está claro que no se puede construir un átomo clásico a partir de esos estados.

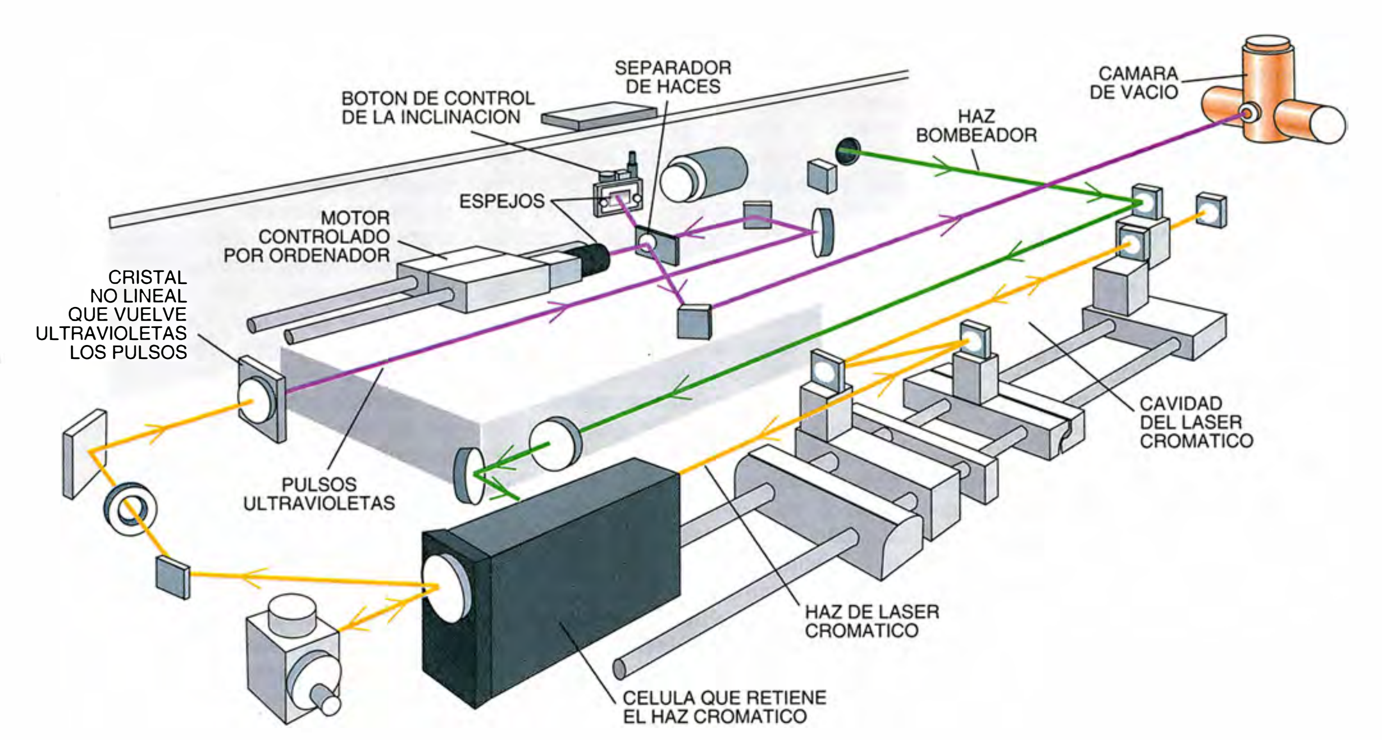
Como señaló Bohr, la clave para lograr la correspondencia clásica es trabajar con estados de mucha energía, que tienen números cuánticos grandes. Las diferencias entre sus energías, cuando son adyacentes, son proporcionales al inverso del cubo del número cuántico principal, lo que quiere decir que, para números cuánticos elevados, los intervalos de energía entre estados adyacentes son casi iguales. En este límite, la localización espacial debería persistir por un tiempo, con lo que el centro del paquete de ondas podría evolucionar de manera clásica. Por tanto, cuanto mayores sean los números cuánticos que se usen, más fácil debería ser que se produjera un átomo clásico, relativamente estable.

Hasta hace poco no había ningún dispositivo experimental gracias al cual pudiera crearse en el laboratorio una superposición de estados atómicos excitados, para así comprobar dicha idea. Se vio que el desarrollo de láseres que emitían pulsos de luz cortos y poderosos daba la solución. Por medio de estos aparatos se obtuvieron, en los años ochenta, los primeros paquetes de ondas localizados. Entre los grupos que tuvieron éxito estaban el nuestro de la Universidad de Rochester, el de Ben van Linden van den Heuvell, del Instituto FOM de física atómica y molecular de Amsterdam, y el de Paul Ewart, de la Universidad de Oxford.

En un experimento típico, un pulso breve de luz ultravioleta, con una duración de sólo 20 picosegundos (20 billonésimas de segundo), corta un haz de átomos de potasio en una cámara donde se ha hecho el vacío. Se usa potasio porque absorbe con facilidad la energía de los láseres y, como el hidrógeno, tiene un electrón disponible para enlaces. Cada pulso excita un electrón, transportándolo desde el estado fundamental a muchos estados muy altos. El resultado es un paquete de ondas localizado a un micrometro de distancia del núcleo.

Es esencial que los pulsos de láser duren sólo picosegundos porque los brotes cortos tienen un espectro de frecuencias ancho. La anchura espectral de un pulso coherente es proporcional al recíproco de su duración; por tanto, para que un pulso tenga una anchura espectral suficiente para que se superponga sobre muchos niveles tiene que ser sumamente breve. La espectroscopía tradicional descansa en pulsos largos; como su banda de frecuencias es estrecha, excitan sólo un estado, o unos pocos. En nuestros experimentos, el número cuántico excitado fue en promedio el 85, y se superponían unos cinco estados.

Sondeamos las características de nuestro paquete de ondas midiendo cómo absorbía la energía de un segundo pulso de láser, disparado poco después del primero. Era en el perigeo de su órbita donde el paquete absorbía más energía. Tanta, que bastaba para arrancar el electrón del átomo. Por consiguiente, para trazar su órbita nos bastaba con contar el número de átomos que se ionizaban a medida que variábamos el tiempo que separaba los dos pulsos de láser. Las señales de ionización concuerdan con la oscilación esperada del paquete de ondas a medida que pasa periódicamente por el perigeo de su órbita.



2. PARA ALCANZAR EL LIMITE CLASICO hay que excitar los átomos con pulsos de luz de láser breves. Un haz de láser verde viene de detrás de la separación. "Bombea" un láser coloreado, que produce entonces pulsos amarillos (se les ve de un verde tenue en la fotografía). El cristal no lineal convierte la luz amarilla en ultravioleta (*invisible en la fotografía*). Un desdoblador de haces separa cada pulso ultravioleta en dos partes que se mueven por caminos diferentes. Un motor controlado por ordenador cambia la longitud de una trayectoria desplazando un espejo. Con estos ajustes uno de los pulsos se rezaga: un incremento de 0,3 milímetros produce un retraso de un picosegundo. Los haces se recombinan y se dirigen hacia los átomos de la cámara de vacío. El primer pulso excita los átomos; el segundo sondea el resultado. Se han omitido en el diagrama, para mayor claridad, los haces rojo y naranja, que sirven para mantener el alineamiento de los espejos, y algunos componentes.

Este método excita órbitas de una energía y un momento angular bastante bien definidos. No selecciona la orientación de las órbitas: el estado del paquete de ondas reside en la forma de un conjunto estadístico de órbitas clásicas. Los miembros del conjunto poseen el mismo radio y la misma excentricidad, pero ocupan todas las orientaciones posibles en el espacio. Esta superposición sólo está bien localizada en la dimensión radial —es decir, en un instante dado su distancia al núcleo está casi tan bien determinada como el principio de incertidumbre de Heisenberg permite. Por esa razón, a este objeto se le llama paquete de ondas radial.

Su movimiento tiene muchos elementos clásicos. Se va alejando del núcleo hacia el extremo de la órbita clásica, y vuelve. El período de esta oscilación es el de un electrón que siguiese una órbita clásica alrededor del núcleo. Además, donde se mueve más despacio el paquete de ondas es en el apogeo de ese circuito y, donde lo hace más deprisa, en el perigeo, lo mismo que los cometas y demás cuerpos en órbita alrededor del Sol.

Al formar un paquete de ondas radial, creamos un estado que exhibe características clásicas. Nuestra meta, sin embargo, era formar un átomo clásico. Desde este punto de vista, el paquete radial tiene una limitación. A pesar del período orbital clásico de sus oscilaciones, sigue una trayectoria planetaria sólo en un sentido estadístico; en el paquete, el electrón traza órbitas orientadas en todos los ángulos. En efecto, las partículas se mueven en una capa esférica que envuelve al núcleo. Ni que decir tiene que un sistema planetario, donde el eje mayor de la elipse que describe un planeta está (aproximadamente) fijo en el espacio, no es así. Además, el paquete se extiende mientras se propaga radialmente, lo que es comparable a un planeta que se rompa mientras se mueve por la órbita.

Jean Claude Gay, Dominique Delande y Antoine Bommier, de la Ecole Normale Supérieure de París, y Nauenberg, uno de los coautores, han presentado una teoría detallada que muestra cómo se construye un paquete de ondas orientado en una dirección particular del espacio. Hallamos que, cuando los números cuánticos son grandes, existe una solución de la ecuación de Schrödinger que equivale a un "estado estacionario elíptico". Es un estado inusual. Los estados atómicos corrientes tienen valores de energía discretos y una gama de momentos angulares. El estado estacionario elíptico, en cambio, consiste en una superposición lineal bien definida de esos estados atómicos ordinarios que se centra en el interior de una dispersión de momentos angulares. La excentricidad de la órbita elíptica correspondiente determina la dispersión. El cuadrado de la magnitud de la función de onda da la probabilidad de hallar el electrón en una posición concreta. Gráficamente, la probabilidad aparece como un abultamiento de la órbita que representa el valor máximo de la función de ondas (*figura 3*).

Hay argumentos clásicos que explican la presencia del abultamiento. El estado mecanocuántico es análogo a un conjunto de electrones que viajen por órbitas clásicas. Como su velocidad es mínima en el apogeo, los electrones tienden a acumularse allí; esa aglomeración produce el abultamiento que se ve en la representación gráfica del estado elíptico y que representa la región donde es más probable que se encuentre el electrón. Construir un estado estacionario elíptico en el laboratorio es mucho más complicado que preparar un paquete

radial. No basta con un corto pulso de láser que excite un átomo. El conjunto de estados que se necesita para formar el estado elíptico requiere una superposición de muchos estados de momento angular, no muchos estados de energía. El haz de láser no puede excitar directamente una superposición así; hay que aplicar simultáneamente a los pulsos un campo adicional. Se han propuesto varias soluciones. Stroud y Yeazell, coautores, han excitado un estado de ese tipo mediante un campo de radiofrecuencias intenso en conjunción con un pulso óptico corto.

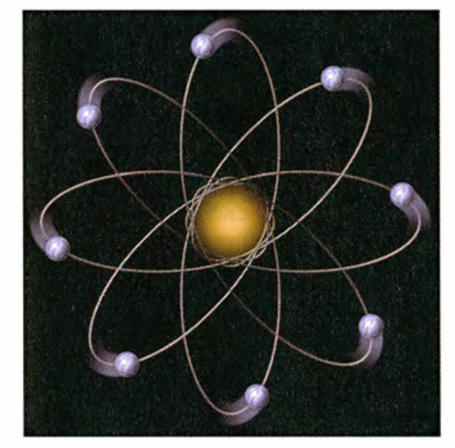
Aunque este estado elíptico tiene una orientación angular definida, es estacionario. No cambia con el tiempo. El paso final en la producción de un estado clásico del átomo consiste en hacer que el paquete de ondas se mueva a lo largo de la trayectoria elíptica. Aunque hemos creado en el ordenador un paquete de ondas así, que es solución de la ecuación de Schrödinger, nadie ha logrado hasta la fecha producir dicho estado en el laboratorio.

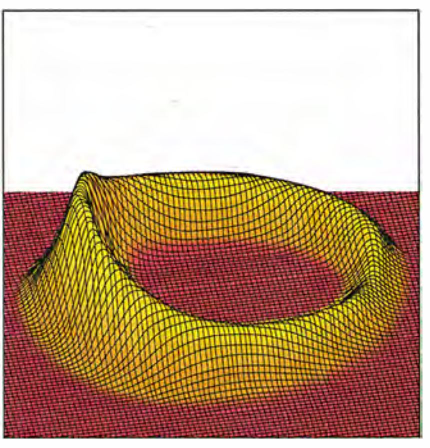
El paquete de ondas teórico que construimos es el estado que más se acerca al clásico de cuantos hemos sabido hacer. Aunque impresionan sus propiedades "clásicas", conserva un trasfondo cuántico. A medida que el paquete se desplaza por el camino elíptico se manifiesta una de sus características cuánticas más obvias. En cada órbita sucesiva el paquete de ondas se dispersa, comportamiento afín al de un grupo clásico de electrones en el que cada partícula se mueve a una velocidad diferente. Un grupo así seguiría dispersándose indefinidamente. Con el paquete de ondas, en cambio, aparece un fenómeno que no es en absoluto clásico: la interferencia cuántica. Ocurre cuando el paquete se muerde la cola y su cabeza empieza a interferir con ella. Entonces, en un momento posterior bien definido, el paquete se reconstituye solo; no hay nada clásico que se parezca a esto. Entre reviviscencia y reviviscencia completa no se puede describir el estado del electrón como un paquete de ondas individual, espacialmente localizado.

Hay, en efecto, ventanas temporales en las que el paquete de ondas se localiza en estructuras más complejas. Son copias en miniatura del paquete original que se mueven clásicamente mientras mantienen posiciones espaciadas uniformemente por la órbita. Se ha caracterizado a estos momentos como reviviscencias fraccionales o parciales. En la etapa llamada de la reviviscencia a medias, el paquete se divide en dos menores. En la reviviscencia a tercios se rompe en tres paquetes, y así sucesivamente. Por definición, una partícula clásica no puede espontáneamente descomponerse y revivir de esta manera, pero una cuántica sí; y lo hace.

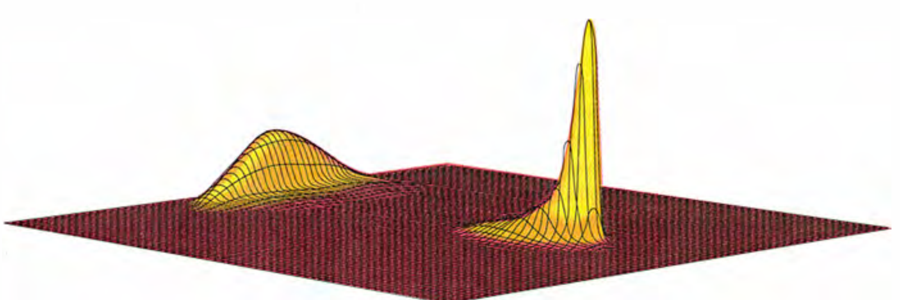
Una analogía clásica puede explicar muchas características de las reviviscencias cuánticas. En particular, se las puede comparar al apelotonamiento de los corredores en la pista de atletismo. Los corredores representan el conjunto de electrones con el que imitamos el estado cuántico. La pista presenta una serie de órbitas clásicas discretas que satisfacen las condiciones cuánticas de Bohr. Al principio de la carrera, los corredores se alinean en la salida; es decir, se hallan localizados. Cada uno corre por una de las órbitas cuantizadas de Bohr. Durante las vueltas iniciales siguen estrechamente apelotonados. Pero, tras unas cuantas vueltas, empiezan a dispersarse por la pista. No causan esta dispersión inicial ni las ligaduras cuánticas ni la naturaleza discreta. Se debe, simplemente, a que el paquete de ondas consta de una colección de ondas de distintas frecuencias —un grupo de corredores que se mueven a diferentes velocidades.

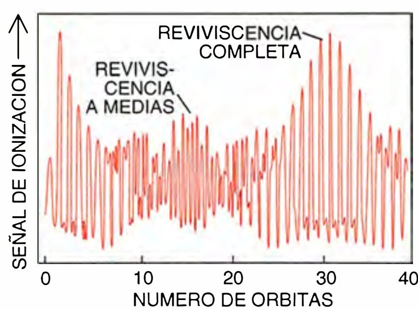
Las características cuánticas empiezan a aparecer cuando los corredores comienzan a apelotonarse de nuevo, es decir, cuando el más rápido alcanza al más lento. La carrera





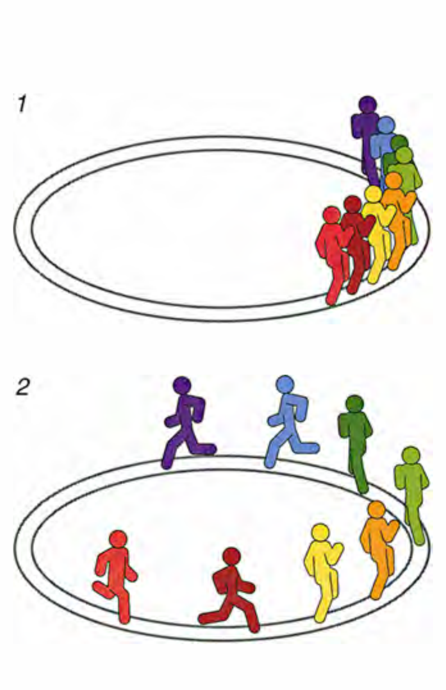
3. CONJUNTO DE ORBITAS CLASICAS (*izquierda*), una de las maneras de describir un paquete de ondas radiales. El paquete consiste en una superposición de varios niveles de energía; en efecto, un electrón se mueve a la vez en muchas órbitas alrededor del núcleo. Si el comportamiento fuese más planetario, las órbitas se situarían en un plano. Ese estado, el elíptico estacionario, se ha conseguido (*derecha*). El abultamiento del lado izquierdo representa la localización más probable del electrón.

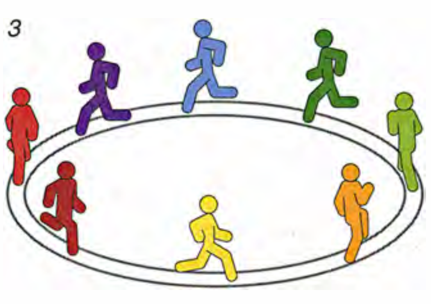


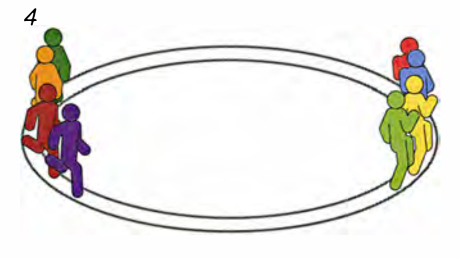


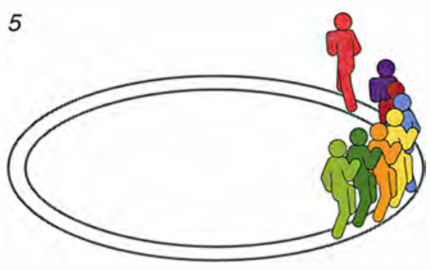
4. REVIVISCENCIA A MEDIAS del paquete de ondas (*izquierda*); es decir, formación de dos paquetes más pequeños una vez se ha dispersado el original. Ese fenómeno ocurre tras unas quince órbitas. Se manifiesta mediante señales de ionización que aparecen con el doble de frecuencia (*derecha*). Tras unas treinta órbitas, la señal de ionización vuelve a su valor original, lo que muestra que el paquete de ondas ha revivido del todo.

5. UNA CARRERA ATLETICA vale para hacerse una idea de las reviviscencias del paquete de ondas. En la salida (*1*), los corredores van en pelotón, lo que representa un paquete de ondas bien localizado. En el transcurso de la carrera, los atletas más rápidos se adelantan (*2*); pronto van alcanzando a los rivales más lentos (*3*). Acaban por formarse dos pelotones (*4*), lo que se corresponde con una reviviscencia a medias. Tras muchas más vueltas, forman un solo pelotón (*5*). Un aspecto insatisfactorio de este modelo es que en realidad la reviviscencia completa ocurre en el lado de la pista opuesto a la localización del pelotón de corredores.









avanza, y los corredores más rápidos siguen pasando a los rezagados. Ocasionalmente, varios corredores formarán un pelotón. A causa de la particular distribución de velocidades que permiten las restricciones cuánticas, hay un instante en que los corredores forman dos pelotones en lados opuestos de la pista. Es la reviviscencia a medias. Las restricciones cuánticas colocan a los corredores en grupos de manera tal que en un grupo están los corredores con números impares y en el otro los de número par.

A medida que la carrera continúa, los corredores vuelven a dispersarse y a juntarse de nuevo, pero en tres grupos. Finalmente, tras dar muchas vueltas, todos los corredores han dado una vuelta entera más que el que le sigue en lentitud, así que se produce una reviviscencia completa. El número de esas reviviscencias fraccionales depende del número de corredores en la carrera. Hacen falta al menos dos para formar un pelotón. Similarmente, en el átomo, el número de reviviscencias fraccionales depende del número de niveles en la superposición. No saldrían en este modelo clásico ni las reviviscencias fraccionales ni las completas sin la imposición de las ligaduras cuánticas que colocan los electrones en órbitas discretas.

Las investigaciones en este campo de la física han mostrado que, a pesar del intento de Heisenberg de eliminarlas, las órbitas clásicas siguen siendo parte de la moderna mecánica cuántica. Pero su papel es mucho más sutil de lo que el propio Bohr pudo sospechar. No se generan los paquetes de onda que viajan por trayectorias clásicas simplemente con dejar que los números cuánticos del sistema se hagan grandes. Se requiere que se formen superposiciones coherentes especiales de estados con números cuánticos grandes para que un paquete de ondas exhiba dos notas clásicas distintivas: la localización espacial y el movimiento a lo largo de una trayectoria orbital. Estas acciones clásicas subsisten sólo durante períodos limitados. Para tiempos mayores, el trasfondo cuántico se manifiesta por sí mismo en fenómenos ondulatorios, inesperados, que carecen de analogía clásica.

Quizá se comprendan mejor estos resultados con teorías que incorporen la dinámica clásica en la mecánica cuántica. Estas técnicas semiclásicas se escapan a la valoración: los cálculos mecanocuánticos ordinarios son difíciles y llevan mucho tiempo, incluso cuando se efectúan con los mayores superordenadores. Además, a menudo no se pueden entender o interpretar físicamente las soluciones numéricas resultantes.

Aunque hace mucho que se vienen usando los métodos semiclásicos, sobre todo en las descripciones de la energía del sistema cuántico, sólo recientemente se las ha extendido con éxito al dominio temporal. Con ellos se puede ahora predecir el comportamiento cuántico, incluso bajo circunstancias no lineales o caóticas. Por ejemplo, Eric J. Heller, de la Universidad de Harvard, y Steven Tomsovic, de la de Washington, estudiaron los movimientos de un paquete de ondas encerrado en una "caja". Mostraron que los métodos semiclásicos describen los movimientos caóticos del paquete tan bien como los cálculos cuánticos. Cabe esperar que estos métodos iluminen otros problemas asociados con el caos cuántico que han recibido después mucha atención. Nos referimos, entre ellos, a la ionización por microondas de los átomos y al comportamiento de los átomos en campos electromagnéticos fuertes.

Por supuesto, con los pulsos de láser intensos de corta duración es posible excitar sistemas que no son átomos. Cuando se excita así una molécula, sus átomos pueden formar paquetes de ondas. Con pulsos preparados adecuadamente cabría quizá controlar la dinámica interna de la molécula.

También se han empleado estas técnicas para formar paquetes de ondas de los electrones, o incluso de huecos dotados de carga positiva, en pozos cuánticos semiconductores. Las oscilaciones coherentes de los paquetes de ondas podrían entonces producir dispositivos inéditos imposibles de construir con medios de excitación habituales. Esos aparatos serían un premio que vendría con la información fundamental que buscamos en el límite clásico de la mecánica cuántica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LASER EXCITATION OF ELECTRONIC WAVE PACKETS IN RYDBERG ATOMS. G. Alber y P. Zoller, en *Physics Reports*, vol. 199, número 5, págs. 231-280; enero de 1991.

OBSERVATION OF FRACTIONAL REVIVALS IN THE EVOLUTION OF A RYDBERG ATOMIC WAVE PACKET. John A. Yeazell y C. R. Stroud, Jr., en *Physical Review A*, vol. 43, número 9, páginas 5153-5156; 1 de mayo de 1991.

SEMICLASSICAL THEORY OF QUANTUM PROPAGATION: THE COULOMB POTENTIAL. I. M. Suárez Barnes et al. en *Physical Review Letters*, vol. 71, n.º 13, páginas 1961-1964; 27 de septiembre de 1993.

Alina Quevedo

ANTONIO LUQUE: *Cazador de fotones*

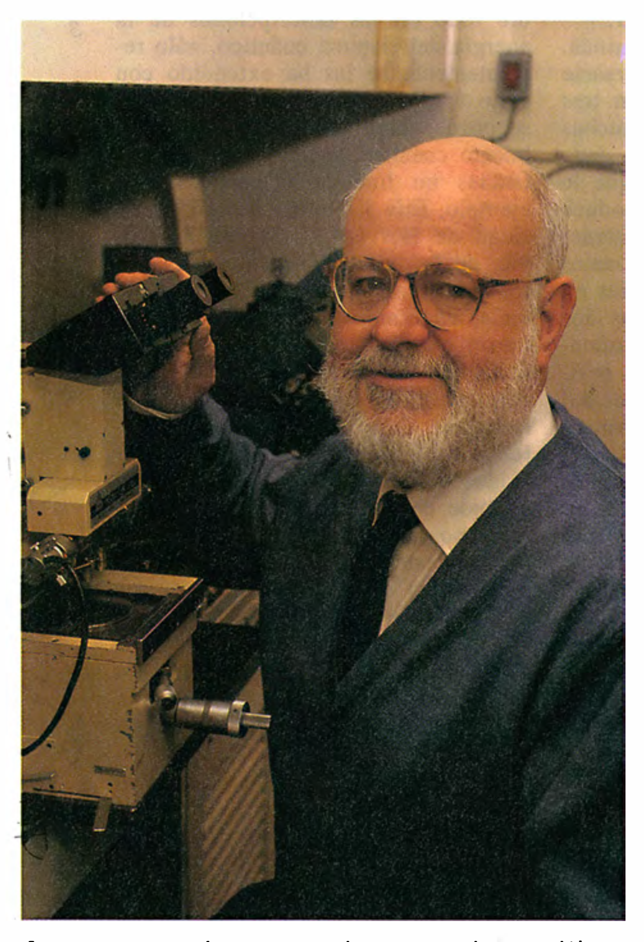
"Sólo nos quedará el sol", dice Antonio Luque. Por si acaso, él lleva veinte años ingeniando células fotovoltaicas, en las que la incidencia de la luz solar genera un flujo de electrones aprovechables. "Más vale que tomemos en serio la opción solar, pues ya hoy hay en la atmósfera mucho más dióxido de carbono que en toda la historia de la Tierra de la que tenemos medidas. No parece prudente insistir en este camino."

Así se pronuncia un malagueño de 53 años, que dirige el Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid, donde trabaja un nutrido y experimentado grupo de expertos con "medios modestos pero bien aprovechados". Tiene en su haber más de 150 artículos científicos, ocho premios, incluidos el García Cabrerizo de 1983, el premio nacional de investigación Torres Quevedo en 1989 y el Alexandre Becquerel, que en 1992 le otorgó la Comunidad Europea.

"Estoy convencido de que no hay un mundo viable fuera de las energías renovables. La argumentación es obvia. Algún día se agotarán los combustibles no renovables, incluido el nuclear. La energía de fusión, aunque se desarrollara, tiene pocas posibilidades de resolver la demanda creciente que se va a producir, sobre todo, en el llamado Tercer Mundo. Además, hay que tener en cuenta los desechos asociados a la producción de energía. Su acumulación resulta insoportable para el entorno terrestre. No hay ecosistema capaz de digerirlos".

Insiste en que urge un cambio en la política energética global. "Es necesario desarrollar las energías renovables, y es prudente hacerlo ya. Aprovechar la biomasa para producir combustibles líquidos y gaseosos. Convertir la luz solar y la fuerza del viento en electricidad. Con un gran esfuerzo se podría reemplazar el sistema actual en unos cuarenta años: contando diez de desarrollo más el período de amortización de las instalaciones operativas. El petróleo y el uranio que quedan apenas cubren ese período".

Antes de dedicarse a la tecnología solar fotovoltaica, Luque obtuvo el doctorado con un trabajo sobre luz coherente. Consiguió el efecto láser con un láser de rubí. La tesis, 64 páginas plagadas de fórmulas matemáticas y dedicada "A mi esposa", materializó en 1966 el primer láser construido en España. Como en tantos trabajos de grado, fue ésa una labor de autodidacto. Ni siquiera en la Universidad de Toulouse, donde había pasado un año ahondando en física del estado sólido, encontró quien le orientara debidamente.



Luque no ve ahora muy claro que el peor libro valga más que el mejor profesor

Tuvo "amores de juventud" con la física y las matemáticas. Casi le conquista "la belleza formal de las matemáticas", que le sigue apasionando. Pero los devaneos con la ciencia pura terminaron al dar con su verdadera vocación, la ingeniería, y a los 28 años era catedrático de electrónica, en la Escuela Técnica Superior de Telecomunicaciones de Madrid. "Conforme maduré por fin, mi interés se centró en la ingeniería. Para mí el ingeniero busca resultados prácticos. Como investigador trabaja sin pretender convertirse en un descubridor, y su misión es aplicar principios bien establecidos. Sólo cuando sea necesario, aunque esto ocurre con frecuencia, debe estudiar asuntos desconocidos", dice.

Apenas desaparecen las primeras volutas de humo de su inseparable pipa, y ya ha dictado una lección magistral. La óptica sin imagen, que estudia las propiedades de los haces de rayos capaces de transportar energía, es uno de sus asuntos favoritos. Con esta herramienta teórica, que él denomina "óptica anidólica", analiza distintos problemas prácticos. En 1978 Luque se interesó por determinar los límites de concentración de fuentes de luz extensas. Su propósito era obtener beneficios de la luz de toda la bóveda celeste, "un radiador con isotropía hemisférica". Esta aproximación le llevó a tratar de aprovechar la luz del cielo nublado, a través de la concentración, es decir, colectando la luz mediante instrumentos ópticos, como espejos o lentes.

En su búsqueda de límites mediante óptica anidólica, Luque desarrolló un prototipo de célula solar bifacial, que satisfacía sus postulados teóricos. "Quería obtener un sistema colector, una célula solar, que recogiera la luz procedente de cualquier dirección. La

idea inicial era integrar una célula bifacial, capaz de recibir energía por las dos caras, a un concentrador estático, para alcanzar una concentración dos veces mayor que con una célula monofacial."

La célula bifacial que patentó en Estados Unidos en 1979 marcó un hito en el rendimiento efectivo de las células fotovoltaicas. Más tarde, Luque mejoró su eficacia. Para conseguirlo, aprovechó también la reflexión de la luz procedente de las paredes y el suelo, pintando de blanco el área circundante a las células. Así, la célula bifacial podía colectar un 50 por ciento más de luz, con lo que su rendimiento efectivo, el mayor obtenido hasta ese momento por células de silicio, superó el 20 por ciento.

Su primer concentrador estático con células bifaciales estuvo listo en 1981. "La forma del concentrador se basó en una idea de Winston y Welford", apunta Luque. "El primer módulo con células bifaciales funcionó bien, pero, por tener muchas células, elaboradas en el laboratorio, sin un proceso de producción en serie idóneo, no dio el rendimiento deseado."

La empresa Isofotón, fundada por Luque y la Universidad Politécnica, en 1983, lanzó al mercado las primeras células bifaciales. Además, la producción de módulos fotovoltaicos por un total de 40 kilowatts para una central fotovoltaica, instalada en San Agustín de Guadalix, demostró su viabilidad. Pero lo que había sido un logro técnico reconocido internacionalmente, no halló suficiente acogida comercial.

Después algunas compañías, TST y Nuken en Alemania, Solarex y Westinghouse en Estados Unidos e Hitachi en Japón, desarrollaron, sin excesivo éxito, distintos modelos de células solares bifaciales. A pesar de las vicisitudes de su invento en el mercado, Luque confía que será una opción apreciada: "En los años noventa las células de más alto rendimiento están próximas a las bifaciales. Martin Green, de la Universidad de Nueva Gales del Sur, que tiene el récord mundial de rendimiento con células de panel plano, está desarrollando células bifaciales. Cuando las consiga, serán las mejores."

Nada le aparta de seguir "a pie de laboratorio", lo que significa exponerse de vez en cuando a la luz solar. Por eso entre sus libros guarda un sombrero de paja. "Me lo regaló un colega", dice, y confiesa que también ha llevado un pañuelo atado con cuatro nudos.

En 1986, dejó el desarrollo de células bifaciales por la tecnología de células de alto rendimiento. Es el promotor del programa de la Comunidad Europea MONOCHESS, para el desarrollo de células de silicio monocristalino. "El silicio monocristalino ofrece un mayor rendimiento y se puede aplicar en células de concentración", dice Luque, que desde 1990 promueve, en el ámbito de la investigación europea, el estudio de la concentración solar.

El opina que la concentración es una de las vías más rápidas para el desarrollo de la electricidad fotovoltaica a costes competitivos. "Creo que un concentrador puede tener importantes ventajas de precio. Y contamina menos que los módulos planos de células solares de silicio." A su juicio, el diseño de concentradores se trata como un problema científicamente trivial. "Mediante nociones elementales y programas de trazado de rayos que tienen mucho de prueba y error", señala, asomando por encima de las gafas unos ojos claros e inquisitivos. "Esto es incorrecto. Existen hoy potentísimos métodos de síntesis para domeñar los rayos solares."

"Más vale que tomemos en serio la opción solar, pues ya hoy hay en la atmósfera mucho más dióxido de carbono que en toda la historia de la Tierra."

En 1992 Luque consigue, con su equipo, un rendimiento del 29,4 por ciento con un nuevo dispositivo llamado el óculo fotovoltaico, que incluye una pareja de células solares, de silicio y de arseniuro de galio, introducidas en una cavidad confinadora de luz, otro invento suyo y de su grupo. Con esto se logra el mayor rendimiento europeo, y uno de los mayores del mundo, el mismo que el obtenido en los EE.UU. para esta pareja de células, a pesar de que allí se usaron las mejores células de cada clase. "Aquí hemos alcanzado ese resultado en el Instituto, gracias a esquemas más avanzados en el acoplamiento de la luz a las células." Sobre el interés de ese hito, declara: "Se trata de los primeros pasos de una investigación a largo plazo, pero si tienen éxito comercial los esquemas al uso de concentración fotovoltaica, éste presenta la posibilidad de reducir los costes todavía más."

Se nota que le divierte la polémica. En su campo de trabajo critica el excesivo optimismo de algunos expertos al estimar el rendimiento de las células fotovoltaicas. "Sin darse cuenta, y por razonamientos parciales, violan el segundo principio de la termodinámica, que estipula que para crear trabajo hace falta un foco caliente y un foco frío. Esto significa que hay un límite en el rendimiento que puede alcanzar un sistema."

Recientemente, una importante revista especializada publicó un trabajo de un científico chino, cuyos resultados describían una célula fotovoltaica para la que reclamaba un rendimiento del 35 por ciento. Algo desmesurado, cuando el máximo alcanzado por una célula de un solo material se halla en el rango del 25 %. El asunto suscitó la controversia entre los expertos. Para algunos especialistas, se trataba de un error de cálculo en las mediciones. Luque, por su parte, eludió enjuiciar los métodos del colega oriental. "Yo no afirmo que sus cálculos estén equivocados. Demuestro que, si son correctos, el segundo principio de la termodinámica es erróneo."

Investigadores de diversos centros estudian ahora las posibilidades de aplicación de superredes, materiales artificiales constituidos por medios diferentes en capas muy delgadas, y organización periódica en la que la función de onda del electrón supera la separación entre un material y el siguiente. Se discute su utilidad para la construcción de células fotovoltaicas. Entre otros aspectos ventajosos, los técnicos especulan que estos materiales permiten sacar más corriente, por un aumento del flujo de electrones. Pero Luque no se suma al entusiasmo.

Como para que no le falten fundamentos básicos a la tecnología fotovoltaica, este catedrático e inventor ha publicado en colaboración con otros especialistas el libro *Solar Cells and Optics in Photovoltaic Concentration*, sobre la física de las células solares de concentración y la óptica para construir concentradores.

Amante de la historia, cuando puede se dedica a completar "Tras el cerco del Peñón", novela ambientada entre 1562 y 1566. La trama incluye comerciantes genoveses con ínfulas nobiliarias y espías moriscos operando en Madrid y Constantinopla. Todo en el luminoso ambiente mediterráneo. La comunidad fotovoltaica quiere conocer esta obra redactada a golpe de diccionario, en el castellano de la época. Aunque Luque admite que el libro ya es "peligrosamente famoso", no tiene intención de publicarlo.

Ciencia y sociedad

Descifrado

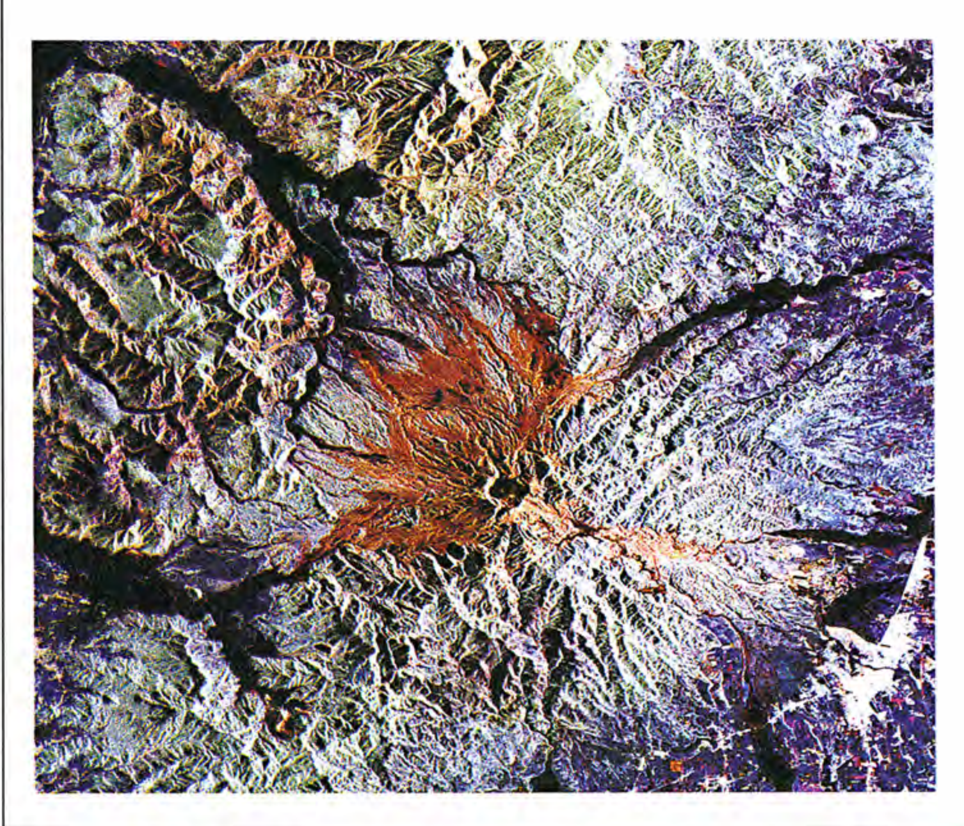
Una apuesta perdida

En octubre de 1977, tres profesores del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) retaron a los lectores de *Investigación y Ciencia* a descodificar un texto cifrado publicado en la sección "Juegos matemáticos" de Martin Gardner. El rompecabezas numérico en cuestión era uno de los primeros ejemplos publicados de aquel sistema criptográfico recién inventado, llamado RSA. El trío constituyente, Ronald L. Rivest, Adi Shamir y Leonard M. Adleman, ofreció una recompensa de 100 dólares a quien ofreciese una frase en texto llano, acontecimiento que —pronosticaron— no podría ocurrir antes de unos 40.000 billones de años. El pasado mes de abril, Arjen K. Lenstra, científico de Bell Communications Research, tres aficionados a la informática y unos 600 voluntarios, usuarios de Internet, reclamaron el cheque con mucha anticipación, tras sólo ocho meses de trabajo.

"Hace 17 años resultaba inconcebible que este código pudiera ser descerrajado jamás," comenta Lenstra. A decir verdad, se considera que el método RSA es uno de los sistemas criptográficos comerciales más seguros existentes. Para codificar un mensaje mediante RSA, se convierte el texto en un número, que es seguida-

La Tierra desde el espacio

La imagen en falso color del monte Pinatubo, (*abajo*), en las Filipinas, la obtuvo el Laboratorio Espacial de Radar, incorporado a bordo de la lanzadera *Endeavor*, en su misión de abril último. Las zonas pardo-rojizas representan cenizas arrojadas por el volcán durante la erupción de junio de 1991; las zonas más obscuras indican la localización de coladas de barro. "Diferenciar entre barro y ceniza es extremadamente difícil desde la Tierra", afirma Diane L. Evans, del Laboratorio de Propulsión a Chorro en Pasadena, experto del Laboratorio Espacial de Radar. "Esta imagen", afirma, "nos ayudará a determinar qué áreas, de las que rodean el volcán, pueden ser pobladas y cuáles pueden sufrir todavía deslizamientos de barro potencialmente letales".



En estos tiempos de recortes económicos, parlamentos y contribuyentes buscan resultados prácticos de las investigaciones agraciadas con presupuestos muy altos. El Laboratorio Espacial de Radar constituye un proyecto realista de la NASA. El conjunto de instrumentos de que consta, valorados en 366 millones de dólares, aprovecha las señales de radar para descubrir indicadores ambientales de interés: densidad de biomasa, cantidad de humedad del suelo y agua contenida en la nieve de la superficie.

Durante los once días de vuelo del *Endeavor*, el Laboratorio Espacial de Radar exploró alrededor del 12 por ciento de la masa continental de la Tierra. Tenía asignadas otras misiones, entre ellas, la de observar las características volcánicas de las islas Galápagos (*página siguiente, arriba*) y las formaciones erosivas del Valle de la Muerte en California (*página siguiente, abajo*). Las imágenes de radar del Valle de la Muerte habrán de revelar los efectos de antiguas inversiones climáticas en la región. A lo largo de este mes de agosto, la NASA se propone lanzar de nuevo el laboratorio para que los científicos puedan examinar cambios ambientales estacionales y cambios inducidos por la acción del hombre.

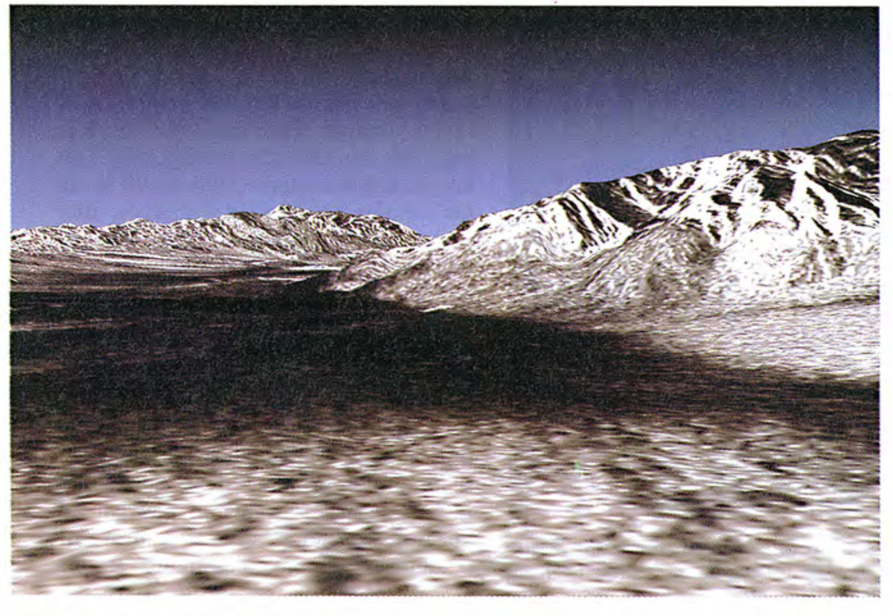
Evans espera que la NASA pague los fondos necesarios para transformar el laboratorio en un satélite. Este podría convertirse entonces en un proyecto paralelo al "Sistema de Observación de la Tierra", pieza central de "Misión al Planeta Tierra", un ambicioso plan que se sirve de las técnicas de percepción remota para seguir las trayectorias de los cambios globales. El Laboratorio Espacial de Radar ha despertado notable interés entre los científicos que tienen puesto su punto de mira en otros mundos, dadas las semejanzas de este sistema de radar con el que viajó a bordo de la nave espacial *Magallanes* que ha venido cartografiando Venus.

COREY S. POWELL

mente elevado a un determinado exponente; del número resultante se va restando repetidamente cierto número grande, el módulo, hasta que el resultado es menor que el propio módulo. El usuario puede entonces publicar el exponente y el gran módulo (datos que reciben el nombre de claves públicas) para que quien lo desee pueda crear con ellos un mensaje secreto. Sin embargo, para determinar la función inversa y recuperar el mensaje es preciso conocer esos dos factores primos (o sea, números divisibles solamente por sí mismos y por la unidad) que, al multiplicarse, producen la clave pública. Aunque el cálculo de productos de números primos grandes es tarea trivial, la descomposición en factores de un número compuesto puede revestir una extraordinaria dificultad.

En el desafío que lanzaron en *Investigación y Ciencia*, Rivest, Shamir y Adleman utilizaron como módulo lo que a la sazón era un número inexpugnable de 129 cifras, más tarde apodado RSA-129. El que Lenstra y sus colegas hayan conseguido romper esta clave atestigua los grandes avances conseguidos a lo largo de los dos últimos decenios tanto en matemáticas como en la posibilidad de utilizar capacidad de cómputo distribuida por todo el mundo. Para la descomposición de RSA-129 fueron necesarias unas 10^{17} instrucciones de ordenador, lo que supone quizás uno de los más grandes y más difíciles cómputos individuales que se han realizado.





"Para disponer de capacidad de cómputo suficiente necesitábamos muchísimos ordenadores y muchísimas personas," explica Paul Leyland, gestor de sistemas informáticos en la Universidad de Oxford, quien contribuyó a poner en marcha el proyecto. La estrategia matemática utilizada por el equipo se denomina criba múltiple cuadrático-polinómica, instrumento que les permitió dividir la tarea en muchas subtareas menores. El algoritmo acaba por separar factores verosímiles correspondientes a números grandes de entre los millones de candidatos que genera.

Leyland, juntamente con Derek Atkins, estudiante de segundo ciclo en el MIT, y con Michael Graff, que cursa el primer ciclo en la Universidad estatal de Iowa, coordinó los esfuerzos de participantes de cinco continentes, comunicados a través de Internet. Estas personas donaron tiempo de cómputo en unos 1600 ordenadores, creando unos 8,2 millones de piezas de datos. Atkins verificó y almacenó las aportaciones en una base de datos en el MIT, enviando después a Lenstra la colección completa. Al cabo de dos días, un superordenador de funcionamiento en paralelo a gran escala extrajo un factor de 64 dígitos y un cofactor de 65 para el RSA-129. ¿Qué decía el texto cifrado de 1977? Pues, THE MAGIC WORDS ARE SQUEAMISH OSSIFRAGE ("Las palabras mágicas son nauseabundo quebrantahuesos"). Rivest explica que eligieron las palabras al azar. "Que yo sepa, no esperábamos volver a tropezarnos con ellas jamás."

Felizmente, los usuarios de programas RSA (de los que se han vendido más de tres millones de ejemplares) no tienen por qué sentirse asqueados por la protección que ofrece su sistema. Hasta el momento, no se ha descubierto ningún algoritmo auténticamente eficiente para calcular los divisores primos de números compuestos de gran tamaño, aunque tal vez algún día llegue a existir uno. Por ahora, Lenstra asimila los métodos de cribado numérico a la búsqueda de millones de agujas en un pajar. Los usuarios de RSA pueden seguir esquivando a los fisgones informáticos valiéndose de claves con más dígitos que los que Lenstra y sus colegas han podido derrotar.

"La importancia de este logro es que nos facilita el ensayo y valoración del sistema y ayuda al usuario a saber el tamaño de los números que utilice," afirma Rivest. Con tal propósito, RSA Data Security, de Redwood City, patrocina una serie de concursos de descomposición fac-

torial, que llegan hasta RSA-500. Lenstra señala que ya son muchas las organizaciones que disponen de la capacidad computacional necesaria para factorizar números de 129 dígitos, por lo que RSA-150, el siguiente de la lista de éxitos, puede no tardar en caer. "La lección que esto nos enseña es que un sistema ahora tenido por seguro puede no serlo mañana", dice Lenstra. Al menos, mientras él esté suelto por ahí.

KRISTIN LEUTWYLER

Cáncer

Enzima de inmortalidad

Las células cancerosas remedan viejas glorias del cine, corroídas por dentro y milagrosamente bendecidas con un vigor eterno. Investigadores de California y Ontario están convencidos de haber identificado el secreto de esa inmortalidad. Parece deberse a cierta enzima, ausente en la mayoría de los tejidos normales, que permite la división ilimitada de las células. Si algún día pudiéramos bloquear esa proteína, significaría que hemos dado con una nueva terapia que dejaría indemnes a los pacientes.

La inmortalidad es norma entre células tumorales y organismos unicelulares. Si disponen del medio adecuado, se reproducen sin tasa. Por contra, las células normales del organismo tienen una esperanza de vida limitada; tras dividirse unas cuantas docenas de veces, acaban deteniéndose y muriendo. Muchos biólogos celulares atribuyen la causa de ese destino a la erosión de los telómeros.

Los telómeros, segmentos de ADN muy repetitivos y dotados de una gran especialización, residen en los extremos de los cromosomas, extremos que estabilizan para evitar que se adhieran entre sí o degeneren. Debido a una peculiaridad de la maquinaria replicativa, cada vez que una hebra del ADN se duplica durante la mitosis, se pierden unas cuantas subunidades de uno de sus extremos; con cada tictac del reloj mitótico, desaparece una nueva rebanada del telómero. Así, vamos perdiendo fragmentos con los años. ¿Pierden las células su capacidad de dividirse cuando, por las mermas, los telómeros no alcanzan ya cierta longitud umbral?

Las células tumorales y los organismos unicelulares estabilizan sus telómeros. Eso quizá las hace inmortales. A mediados de los ochenta, se demostró que los protozoos sintetizaban telomerasa, enzima que añade secuencias nuevas a los telómeros y mantiene su longitud. Las células humanas poseen también el gen de la telomerasa, pero la mayoría de ellas no lo expresan después del nacimiento. Salvo en los testículos del varón, que usan la telomerasa, eso se supone, para reconstruir los telómeros de los espermatocitos.

De los experimentos realizados en cultivos de células humanas transformadas por virus tumorigénicos se desprende que los tumores cuentan, a su vez, con la colaboración de la telomerasa. Calvin B. Harley y Carol W. Greider observaron, hace dos años, que las células transformadas crecían sin control y presentaban los signos característicos de células tumorales. Pero sólo unas cuantas de esas células anormales poseían actividad telomerasa, justamente las que se habían hecho inmortales.

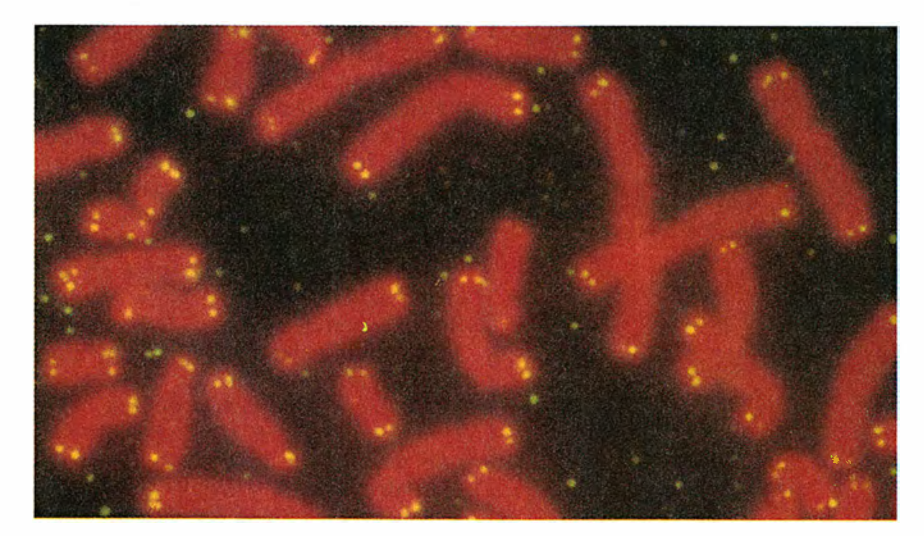
En la Universidad McMaster, Harley y Silvia Bacchetti han comprobado que las células del carcinoma de ovario expresa la telomerasa. No sucedía así en los extractos de las células normales. Los telómeros de las células cancerosas, aunque más cortos que los de las células normales, eran estables —un hecho coherente con la hipótesis según la cual la mutación activante de la telomerasa había tenido lugar en algún momento después de que se iniciaran los cambios tumorigénicos.

Si la telomerasa es la enzima inmortalizante en los tumores y falta en la mayoría de las células normales, quiere decir que encierra un tesoro por lo que respecta a la terapia anticancerosa. Los fármacos que inhiban la telomerasa arrancarán de las células tumorales su inmortalidad. Los inhibidores de la telomerasa no destruirían las células tumorales, pero detendrían su proliferación, lo que potenciaría la eficacia de otros agentes anticancerosos.

A diferencia de los tratamientos quimioterápicos al uso y la radioterapia, que dañan cuantas células del organismo se hallen en proceso de división, los inhibidores podrían producir escasos efectos secundarios.

Hay cierta preocupación en torno a las células madre (stem cells), presentes en las placas intestinales, la médula ósea y otros tejidos. Se trata de una estirpe que debe regenerarse con frecuencia. Las células madre, que dan lugar por división a todo un repertorio de células derivadas, podrían necesitar de la intervención de la telomerasa. La negatividad de las pruebas en las que se busca la actividad telomerasa en los tejidos normales podría significar que se han escapado sin detectar vestigios de ésta en las células madre. "Si el 99 % de las células no tiene telomerasa, uno podría no advertir el 1 % de las que lo tienen", subraya Greider.

Los estudios sobre la telomerasa, además de su interés oncológico, podrían avivar las esperanzas de quienes andan a vueltas con la longevidad. "Si introdujéramos la telomerasa en las células del organismo, ¿podríamos alargar con ello los telómeros?", se pregunta Greider. Si así sucediera, las células del organismo podrían tal vez rejuvenecer y, con ello, prevenir o detener el envejecimiento y sus efectos. Algunos gerontólogos rechazan esa idea, argumentando que es



*Los telomeros (*amarillo*) de los extremos de los cromosomas se acortan a medida que las células envejecen y se dividen. La enzima que restaura la integridad de tales estructuras podría ser responsable de la inmortalidad de las células cancerosas*

difícil escaparse a la garra del paso de los años.

JOHN RENNIE

Bosón de Higgs

Búsqueda sin término

Los métodos de trabajo de los "cazadores de partículas", los físicos de altas energías, han cambiado mucho desde que Carl David Anderson descubriera en 1932 el positrón estudiando las trazas dejadas por los rayos cósmicos en una cámara de niebla.

La primera revolución llegó cuando se pudo disponer de aceleradores capaces de suministrar a los protones una energía tan alta, que, al chocar éstos con núcleos en reposo, se produjeran partículas secundarias. Los investigadores pasaron así de ser meros espectadores que aguardaban pacientemente una colisión afortunada de los rayos cósmicos, a actores capaces de crear en su laboratorio las condiciones adecuadas para producir nuevas partículas y de repetir esas condiciones una y otra vez. Esto permitió detectar partículas de vida media cortísima y condujo a la explosión en el número de hadrones (partículas que experimentan la interacción fuerte) que tuvo lugar a principios de los años sesenta.

El segundo cambio fundamental vino impuesto por la complejidad creciente de las colisiones al aumentar la energía. Queríase, además, descubrir procesos cada vez menos probables. En el choque de un protón de 100 gigaelectronvolts (1 GeV corresponde aproximadamente a la masa en reposo del protón) con un núcleo se suele producir más de una decena de hadrones secundarios. Pero hay que analizar centenares de miles de tales colisiones para encontrar alguna que contenga una partícula interesante. Hasta los años setenta, este trabajo consistía en ir buscando visualmente, en las fotografías obtenidas, las trazas de las partículas. Para analizar un número alto de sucesos hubo que esperar al registro electrónico de las características de cada choque, datos que luego se procesaban mediante ordenadores.

Cuando ahora se pretende descubrir una partícula nueva en las colisiones producidas en los grandes aceleradores —el Tevatrón del Laboratorio Fermi en Chicago o el colisionador LEP ("Large Electron Positron Collider") del CERN en Ginebra—, se empieza por determinar cuál sería su señal experimental; es decir, qué características específicas del proceso en que se crea permiten distinguirlo del resto de los choques, en los que sólo aparecen partículas conocidas. Una vez decididas esas características, se procesan mediante ordenador todos los sucesos registrados en el acelerador para identificar cuáles las poseen. Se examinan luego los candidatos seleccionados, para comprobar si se trata de procesos nuevos, si son sucesos ordinarios mal medidos o si tienen una configuración muy poco probable.

La obsesión de los físicos de altas energías es hallar el bosón de Higgs, partícula de capital importancia en el modelo estándar sobre el universo, pues es la que da origen a la masa de los bosones W^+, W^- y Z^0, de los leptones y los quarks. Los bosones W^+, W^- y Z^0 transmiten la fuerza débil que actúa entre quarks y leptones. El conocer las propiedades del bosón de Higgs podría, además, aportar valiosas pistas sobre fenómenos nuevos.



Vista aérea del Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN). En el anillo mayor (LEP), de 27 kilómetros de circunferencia, circulan electrones y positrones con energía suficiente para formar el bosón Z^0 al colisionar

Se entiende, pues, que los experimentos del acelerador LEP pongan en el bosón de Higgs una de sus prioridades. La búsqueda, hasta ahora infructuosa, ha permitido establecer que, de existir, su masa deberá ser superior a 62 GeV. Este valor roza ya el límite alcanzable en dicho acelerador, y no se esperan progresos significativos hasta que comience su segunda fase de funcionamiento, LEP200, con el doble de energía.

La determinación de las señales que sirven en el LEP para detectar el bosón de Higgs se basa en que su producción va unida a la de un bosón vectorial intermediario Z^0.

En el marco del modelo estándar, la partícula de Higgs se caracteriza por interaccionar con todas las partículas en proporción a su masa. A las energías accesibles en el LEP, el bosón de Higgs, de producirse realmente, daría lugar la mayoría de las veces a "chorros" de hadrones. Por otro lado, el Z^0 se desintegra en hadrones un 70 % de las veces, el 20 % en neutrinos, partículas de muy débil interacción y, por tanto, invisibles en el experimento, y el 10 % en un par de leptones cargados.

Los sucesos donde tanto el bosón de Higgs como el bosón Z^0 se desintegran en hadrones se parecen muchísimo a las colisiones "normales", hasta el extremo de resultar indistinguibles de éstas. Por ello se buscan dos tipos de sucesos: colisiones en las que aparezcan hadrones acompañados de dos leptones de alta energía y sucesos con hadrones en los que se detecte la desaparición de una fracción importante de la energía total, lo que pondría de manifiesto la produción de neutrinos, procedentes de la desintegración del Z^0.

Hay muchas razones para sospechar que, aunque en extraordinaria sintonía con los hechos experimentales, la teoría actual sobre el origen del universo no es completa. En efecto, postula el modelo estándar que los neutrinos carecen de masa. Sin embargo, existen datos procedentes de la astrofísica y de la cosmología que sugieren que los neutrinos tiene una pequeña masa. Ejemplos son el déficit de los neutrinos solares y el dilema de la materia oscura. Por otro lado, de no tener masa, los neutrinos serían muy excepcionales con relación a las otras partículas fundamentales, lo que resulta difícil de entender.

Se han propuesto modelos para dar masa a los neutrinos que postulan la existencia de otros bosones de Higgs, además del usual. En algunas de es-

tas teorías que pretenden ir más allá del modelo estándar, las desintegraciones del bosón de Higgs difieren notablemente de las predichas por la teoría actual. Ello significa que las búsquedas a las que antes nos referíamos no serían aplicables directamente, lo que requiere replantear las estrategias de búsqueda a la luz de estos nuevos modelos. Con este objetivo, los autores, junto con J. C. Romao, publicaron recientemente en *Physics Letters* un artículo en el que se generalizan los métodos de búsqueda del bosón de Higgs en el LEP al caso de modelos en los que el Higgs se desintegra en partículas invisibles. En dicho caso, los sucesos a buscar son aquellos en que la partícula Z^0 se desintegra en hadrones o leptones; la señal experimental consiste entonces en la desaparición de energía en sucesos hadrónicos o leptónicos.

Combinando los análisis de los datos de los experimentos del LEP en la búsqueda del Higgs estándar con otros elaborados para el caso en que el Higgs se desintegre en partículas invisibles, los firmantes de ese trabajo obtienen cotas generalizadas, aplicables independientemente del modo de desintegración del bosón de Higgs.

En esta clase de modelos, el parámetro de interacción del Higgs con el bosón Z^0 es menor que en el modelo estándar. Para cada valor fijado de este parámetro, que determina la probabilidad de que se produzca un bosón de Higgs además de una partícula Z^0 si hay energía suficiente, se puede, al igual que en el modelo estándar, poner una cota inferior a la masa del bosón de Higgs.

¿Qué ocurre en el caso límite de que el Higgs interaccione con la partícula Z^0 con la misma intensidad que en el modelo estándar? Se obtiene una cota para su masa muy similar a la que se aplica en el caso estándar, aunque el Higgs pueda desintegrarse en partículas invisibles. Pero si la interacción del Higgs con el bosón Z^0 fuera más débil que lo que predice el modelo estándar (y, por ende, resultara más raro que se produjera la partícula de Higgs en las desintegraciones del Z^0), no cabría descartar que su masa fuera menor que 62 GeV. Los nuevos análisis de los resultados sugieren incluso cotas inferiores más restrictivas.

La nueva fase de los experimentos del LEP con el doble de la energía de los haces podría extender el potencial de búsqueda del Higgs hasta valores más elevados de la masa, de unos 90 GeV. De no encontrarse ninguna señal, podría optarse por una de estas tres conclusiones alternativas: la masa del bosón de Higgs supera los 90 GeV; la interacción del mismo con el bosón Z^0 es más débil que la predicha por la teoría estándar (la opción de los modelos aquí expuestos) y el bosón de Higgs no existe.

Aunque la última alternativa pueda ser verdadera, no podrá defenderse con certeza, habida cuenta de que las otras dos entran dentro de lo admisible. Para lograr mayores energías se han proyectado otros aceleradores que pueden alcanzar valores de la masa del Higgs muy superiores a las posibilidades del LEP. Nos referimos, por ejemplo, al gran colisionador de hadrones (LHC), cuya construcción está en los planes del CERN; pensamos también en el llamado próximo colisionador lineal (NLC). Las diferentes propiedades del bosón de Higgs aquí examinadas pueden tener consecuencias que habrá que considerar a la hora de idear métodos de búsqueda para los aceleradores del futuro.

A. LÓPEZ-FERNÁNDEZ
Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN)

F. DE CAMPOS Y JOSÉ W. F. VALLE
Instituto de Física Corpuscular, CSIC y Universidad de Valencia

Arquitectura helenística

En un santuario ibérico

Desde el siglo pasado, se ha venido estudiando la religiosidad de los pueblos ibéricos, de manera casi exclusiva, a partir de los exvotos de piedra, terracota y bronce. Buena parte de ellos proceden de La Luz, Cerro de los Santos, El Cigarralejo o Despeñaperros, santuarios de cuya arquitectura o función poco o nada sabemos.

Los trabajos emprendidos desde comienzos de los noventa por la Universidad de Murcia, el Ayuntamiento de Caravaca de la Cruz y la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia en el complejo arqueológico de La Encarnación, probable sede de la antigua ciudad de *Asso*, han sacado a la luz un nuevo santuario ibérico, que adquirió rango monumental tras la conquista romana con la construcción de dos templos superpuestos, de dimensiones, características y estado de conservación excepcionales.

La ciudad ibérica y romana de *Asso*, limitada por impresionantes murallas, se sitúa a ambos lados de un desfiladero que atraviesa el río Quípar, afluente del Segura. Por este desfiladero, en el que abundan las fuentes, pasa la ruta que comunicaba las campiñas de Córdoba y Jaén con la salida al Mediterráneo por el valle del Segura. Una ruta que permaneció activa como cañada de ganado (camino real) hasta la época moderna.

Junto a la ciudad, en situación independiente y como marca visible desde todo el territorio circundante, se alza una ermita del siglo XVI. Era ya conocido que la ermita se levantaba sobre restos de época antigua, pero la importancia real de la misma no comenzó a valorarse hasta su declaración como monumento histórico artístico nacional en 1980 y los posteriores trabajos de excavación y restauración.

La iglesia arranca de una impresionante plataforma de sillería. Sus paredes son, en buena parte, los muros de sillares de la *cella* o cámara de culto de un templo clásico. En torno a la capilla fueron agregándose, durante los siglos XVIII y XIX, una serie de dependencias, cimentadas con fragmentos arquitectónicos del templo: fustes, capiteles y arquitrabes.

Las excavaciones en torno a la iglesia han permitido documentar la existencia de un segundo templo *in antis*, de menor tamaño, junto a numerosos restos arquitectónicos, una valiosa colección de exvotos de piedra y terracota y un contexto cerámico dominado por las producciones ibéricas locales y escasas importaciones itálicas de los siglos II y I a.C. A poca distancia, en la ladera de la colina, se han investigado las canteras de donde se extraía la piedra para levantar los templos.

Los arqueólogos han descubierto bajo la ermita un mínimo de tres templos superpuestos. Un primer edificio, de fines del siglo III a.C., fue sustituido a principios del siglo II a.C., poco después de convertirse la región en provincia romana, en un amplio templo *in antis* decorado con lastras de revestimiento y antefijas de Sátiras y Ménades, traídas expresamente desde el Lacio.

Más tarde, en un segundo proceso de monumentalización, el edificio fue reconstruido en su totalidad, transformándose en un gran templo de 8 × 10 columnas. Se trata de un caso único en el Occidente mediterráneo, que corresponde a la tradición helenística de los templos pseudodípteros de orden jónico que hasta ahora aparecían reservados a Asia Menor y que, según Vitrubio, tendrían su origen en las obras de Hermógenes de Alabanda. No obstante, como el templo fue decorado con columnas jónicas de





Ermita de La Encarnación (s. XVI) levantada sobre los restos del templo clásico y detalle de la plataforma de sillares con una de las bases de la columnata perimetral todavía in situ. *Se aprecia también el muro de sillares de la cella reutilizada como nave de la iglesia*

tipo itálico (con cuatro volutas), hemos de imaginar el traslado hasta el santuario de un taller que se inspiraba en otras fuentes.

Para entender este proceso iniciado en el siglo II a.C. hemos de valorar el papel intermediario desempeñado por el puerto cosmopolita de *Carthago Nova*, en pleno auge económico y comercial durante los siglos II y I a.C., esplendor que debe a la explotación intensiva de sus vecinas minas de plata por los *negotiatores* romanos e itálicos.

Los exvotos ofrendados en el santuario de La Encarnación fueron en un comienzo toscas figuras humanas, realizadas en piedra. Les sustituyeron más tarde ofrendas de terracota: vasos de libaciones con forma de caballos y palomas, figuritas humanas y animales, cajas, placas con escenas en relieve, etc. La presencia, entre las ofrendas, de fichas diversas da pie para atribuir al santuario un carácter oracular por el procedimiento adivinatorio de las *sortes*. La ausencia de epigrafía no permite concretar todavía la divinidad venerada, probablemente una "Diosa Madre" ibérica, protectora de los ganados y de la fecundidad; era también una divinidad guerrera, destinataria de pequeñas falcatas votivas.

A lo largo del siglo II a.C., Roma potenció, según parece, la transformación monumental de los grandes lugares de culto ibérico como herramienta de control escenográfico. Los gobernadores o las élites locales en su nombre favorecían los sincretismos entre las divinidades tradicionales del mundo ibérico y las formas de culto itálicas, como un medio de atestiguar la existencia de un nuevo orden político. En el cercano santuario curativo del Cerro de los Santos las imágenes de orantes ofrendadas como exvotos comienzan a vestir togas "a la romana", ya en los siglos II y I a.C, lo que nos revela cuán rápida e intensa fue esa transformación.

SEBASTIÁN RAMALLO,
Universidad de Murcia

JOAQUÍN RUIZ DE ARBULO,
Universidad de Lérida

Proliferación celular

Inhibidores

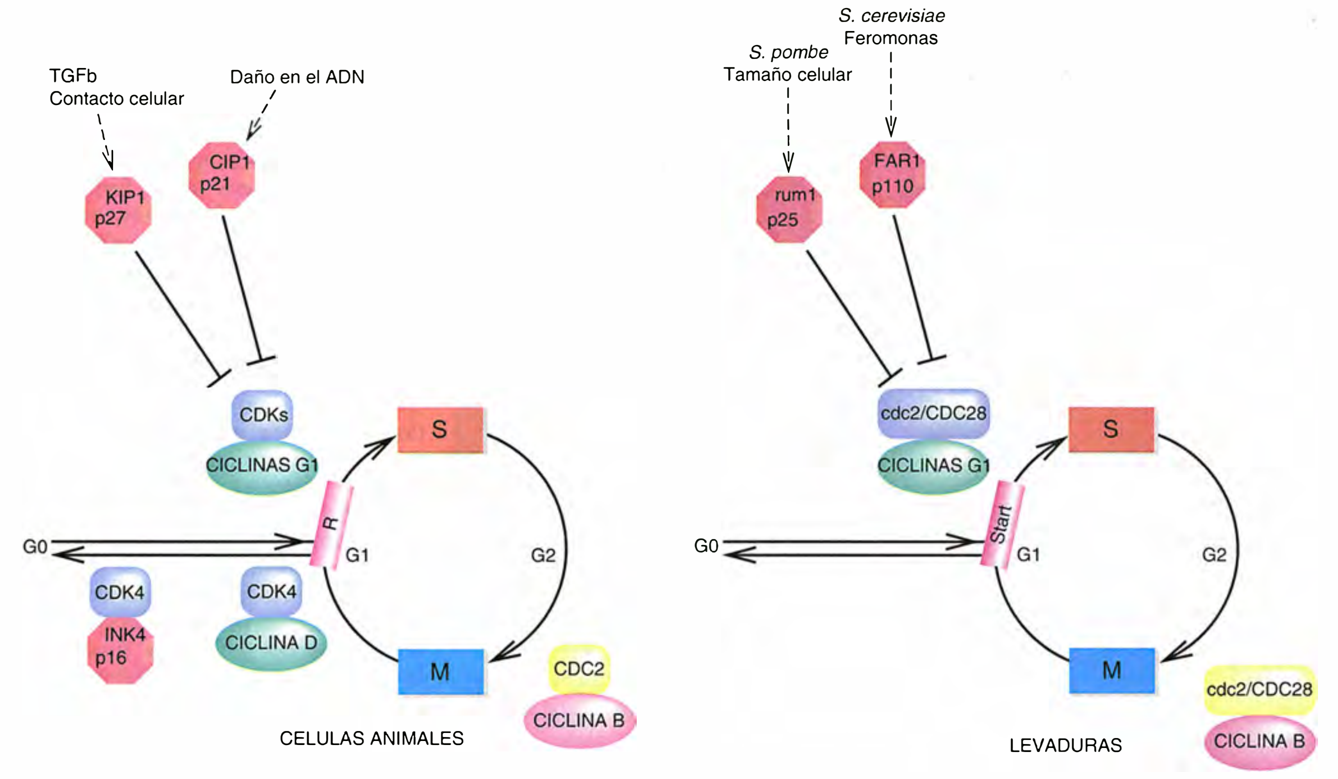
El desarrollo embrionario temprano en animales se caracteriza por una rápida proliferación celular, seguida por procesos de diferenciación y de morfogénesis. Durante este proceso, las células reciben constantemente información de otras células y del medio externo por medio de los factores de crecimiento y de diferenciación. Tal información determina que las células continúen dividiéndose o que se diferencien en tipos celulares específicos para formar los distintos tejidos y órganos. Algunas células son eliminadas mediante un proceso de muerte programada denominado apoptosis.

Para asegurar un desarrollo coordinado, es necesario que cada célula ejecute correctamente sus ciclos de división. El ciclo celular presenta dos fases comunes en todas las células eucariotas: la primera, denominada S (fase de síntesis), durante la cual se replican los cromosomas, y la segunda, M (mitosis), en la que los cromosomas replicados se segregan a las dos células hijas. Estas dos fases están separadas por dos intervalos denominados G1 y G2 que preceden a las fases S y M, respectivamente.

Existen mecanismos de control en cada fase del ciclo celular que aseguran que una fase no se inicie hasta que la anterior haya terminado con éxito. Por ejemplo, si la síntesis de ADN no ha sido correcta, se activa un mecanismo de seguridad que impide que la célula entre en mitosis; una entrada en mitosis sin haber realizado una fase de síntesis correcta conduce a la muerte celular por aberraciones en la segregación (si la síntesis de ADN no ha sido total) o a la fijación de una mutación (si, por ejemplo, no se ha reparado un pequeño error en el ADN).

¿Cómo se lleva a cabo esta coordinación? ¿Cúal es la base molecular de estos mecanismos? Las moléculas centrales en la regulación del ciclo celular son los complejos formados por una enzima y una proteína reguladora de su actividad: los complejos CDK/ciclinas. Las CDK (de "Cyclin Dependent Kinases) son quinasas, capaces de fosforilar residuos de serina y treonina, cuya actividad depende de su asociación con las ciclinas. El nivel de las ciclinas varía a lo largo del ciclo celular, mientras que el de las CDK permanece constante. En las células animales existen varias CDK y varias ciclinas. Cada CDK tiene distinta afinidad por las diferentes ciclinas. Así, la expresión periódica de una ciclina posibilita que se puedan formar complejos CDK/ciclina específicos en determinados momentos del ciclo celular, donde estos complejos ejercen su función, debido presumiblemente a sus diferentes especificidades de sustrato.

Existen dos puntos cruciales de control en el ciclo celular sobre la acti-



El ciclo celular presenta dos fases comunes en todas las células eucariotas: la de síntesis, o S, durante la cual se replican los cromosomas, y la de mitosis, o M, en la que los cromosomas replicados se segregan a las dos células hijas. Estas dos fases están separadas por los intervalos G1 y G2 que preceden a las fases S y M, respectivamente. Las transiciones entre las fases G1/S y G2/M están controladas por la activación periódica de los complejos CDK/ciclinas. En las levaduras, la subunidad catalítica del complejo es una proteína de 34 kDa con actividad proteína quinasa codificada por el gen cdc2+ en S. pombe *y por CDC28 en* S. cerevisiae. *En las células animales, la maquinaria molecular que lo controla es más compleja y contienen una diversidad mayor tanto de CDK como de las ciclinas que se asocian a ellas. Al final de la fase G1, existe un período conocido como punto de restricción en las células animales o "Start" en las de levaduras, en el que se hace balance de la situación intracelular y extracelular y las células deciden si van a seguir dividiéndose o no. Las señales positivas, como la presencia de factores de crecimiento, contribuyen a aumentar la expresión de las ciclinas de G1; por el contrario, las señales negativas inducen la expresión o activación de una serie de inhibidores que bloquean los complejos CDK/ciclinas*

vidad de los complejos CDK/ciclinas. Uno de ellos se produce en la transición G2/M. El paso por este punto depende de la actividad de un complejo CDK/ciclina concreto, como por ejemplo CDC2/ciclinaB en células de mamífero, que se encarga de fosforilar los sustratos implicados en la reestructuración del citoesqueleto y del núcleo necesarios para la entrada en mitosis. (La actividad de este complejo está controlada por una proteína fosfatasa y una proteína quinasa que regulan el estado de fosforilación de una tirosina localizada en el sitio de unión del ATP de CDC2. Cuando este aminoácido está fosforilado, el complejo CDC2/ciclinaB es inactivo. Al final de G2, la proteína fosfatasa elimina el grupo fosfato, el complejo se activa y dispara el inicio de la mitosis (*véase* "Así comienza la mitosis", por Sergio Moreno en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1992).

El otro punto importante de control está localizado en la fase G1 del ciclo celular. Se denomina punto de restricción en células de mamífero o "Start" en levaduras. En él se comprueban las condiciones extracelulares (presencia de factores de crecimiento o de inhibidores de crecimiento, nivel de nutrientes) e intracelulares (tamaño celular, finalización de la mitosis previa). Si estas condiciones son favorables, la célula pasa el control y se "compromete" a realizar un ciclo celular completo. Pero si son desfavorables, deja de dividirse y, en determinadas circunstancias, inicia un programa alternativo de diferenciación celular. El paso por el punto de restricción depende de la acumulación de varias ciclinas necesarias para la activación de los complejos CDK/ciclinas en G1. Las ciclinas de G2 no son limitantes para determinar el momento del inicio de la mitosis. Sin embargo, las de G1 sí lo son para el comienzo de la fase S, ya que su superproducción reduce la longitud de la fase G1. Además de estos reguladores positivos de los CDK en G1, en los últimos meses se han descubierto reguladores negativos que inhiben los complejos CDK/ciclinas en dicha fase. Estas proteínas CDI (de "Cyclin-Dependentkinases Inhibitors") funcionan como auténticos "frenos" de la proliferación celular.

El primer inhibidor negativo identificado, por el grupo de Ira Herskowitz de la Universidad de California en San Francisco, es la proteína FAR1 de la levadura *Saccharomyces cerevisiae.* En este organismo, la salida del ciclo mitótico para iniciar la diferenciación sexual requiere que las células se bloqueen en la fase G1 del ciclo celular, antes del punto de restricción ("arranque" o "Start"). El bloqueo se produce como consecuencia de una cascada de transducción de señales provocada por hormonas sexuales (feromonas) secretadas al medio de cultivo por las células de tipo sexual opuesto. Estas feromonas son péptidos pequeños que interaccionan específicamente con receptores de la membrana acoplados a unas proteínas G, produciendo una cascada de fosforilaciones mediadas por proteínas homólogas a las MAP quinasas

de mamíferos. Una de las últimas consecuencias de esta cascada es la fosforilación de la proteína p120^{FAR1}, proteína fosforilada que puede unirse a los complejos CDC28/CLN (complejos CDK/ciclina de G1 en *S. cerevisiae*) e inhibirlos; de manera que, como la actividad quinasa de CDC28/CLN es necesaria para pasar por "arranque", se produce un bloqueo en G1 que permite la conjugación de dos células.

Nuestro grupo ha identificado un inhibidor similar en la levadura de fisión *Schizosaccharomyces pombe*. En este organismo, la proteína p25^{rum1} es un regulador importante de la fase G1 del ciclo celular. En su ausencia, las células tienen una fase G1 muy corta (con un fenotipo muy similar al de la sobreproducción de las ciclinas de G1) y son incapaces de detenerse en G1 para llevar a cabo la conjugación. Al igual que p120^{FAR1}, p25^{rum1} inhibe la actividad quinasa asociada a cdc2 (la única CDK de *S. pombe*).

Aunque todavía no se han encontrado homólogos estructurales de estas dos proteínas en células animales, se han identificado otras proteínas con propiedades similares. La proteína p21$^{CIP1/WAF1}$ fue identificada a finales de 1993 por varios grupos de investigación que seguían estrategias diversas. La proteína p21 se asocia a los complejos CDK/ciclinas en células no transformadas junto a la proteína PCNA (antígeno nuclear de proliferación celular). Estos tetracomplejos están desorganizados en células transformadas por virus oncógenicos y en pacientes con el síndrome de Li Fraumeni, que poseen una proteína p53 alterada. Se ha comprobado, además, que la asociación *in vivo* e *in vitro* de p21 a los complejos CDK/ciclina inhibe la actividad quinasa de éstos.

El gen CIP1/WAF1 que determina la proteína p21 se aisló independientemente por el grupo de Bert Vogelstein, de la Universidad Johns Hopkins, como un gen inducido por el supresor tumoral p53. Este gen posee en su promotor un sitio de unión para el factor de transcripción p53, lo que sugiere que p21 forma parte del mecanismo molecular mediante el cual p53 inhibe el ciclo celular en G1, para permitir la reparación del ADN en células dañadas. En las células transformadas no se produciría p21, bien porque p53 está alterado o porque lo han secuestrado proteínas oncogénicas, como el antígeno T del virus SV40. De esta forma el paso por el punto de restricción ya no sería controlado y se produciría una proliferación celular desorganizada.

Otro regulador negativo de la proliferación celular a través del punto de restricción es el producto del gen del retinoblastoma, Rb, aislado como un supresor tumoral que se asocia a proteínas oncogénicas víricas. Cuando Rb está desfosforilado, secuestra al factor E2F necesario para la transcripción de genes requeridos para la entrada en la fase S del ciclo celular. Cuando está fosforilado (o asociado a proteínas oncogénicas víricas), se deshace esa unión, E2F queda libre y se promueve la entrada en la fase S, superando el punto de restricción. Se sabe que una de las funciones de los complejos CDK4/ciclinaD es la fosforilación de Rb, contrarrestando su acción inhibidora. Manuel Serrano, del grupo de David Beach en los laboratorios de Cold Spring Harbor, ha identificado la proteína p16^{INK4} que compite con la ciclina D por la unión a CDK4, con lo que el complejo CDK4/ciclina D no se forma y la proteína Rb permanece desfosforilada. Este gen reviste especial interés, pues ha sido clonado independientemente por los grupos de Carson en la Universidad de San Diego en California y de Skolnick en la Universidad de Utah, como un antioncogén, localizado en la región cromósomica 9p21, que se encuentra reorganizado y delecionado en un gran número de procesos tumorales.

Por último, el grupo de Joan Massagué, del Centro de Investigación del Cáncer Sloan-Kettering de Nueva York, ha aislado una proteína de 27Kd que se induce en la fase G1 en respuesta al tratamiento con TGFß. Este mismo grupo ha demostrado que la p27^{KIP1} se une, *in vitro*, a los complejos CDK2/ciclinaE y los inhibe. Por lo que se ha propuesto que la proteína p27^{KIP1} es el CDI implicado en el mecanismo de inhibición del crecimiento celular provocado por TGFß. Esta misma proteína se induce cuando las células inhiben su crecimiento por contacto. Es posible que sobre este CDI confluyan diferentes señales de inhibición de la proliferación celular.

En resumen, en los últimos meses se han descrito una serie de proteínas inhibidoras de la proliferación celular que actúan en la fase G1 del ciclo celular conectando las distintas vías de señalización intra y extracelulares con la maquinaria del ciclo celular. Estos inhibidores funcionan a modo de frenos o barreras que la célula tiene que superar para poder dividirse. Está claro que la pérdida de uno o varios de estos inhibidores pueden conducir a la proliferación celular descontrolada y, por tanto, es bastante probable que estos genes estén alterados en procesos neoplásicos, como de hecho ya se ha visto en el caso de INK4.

CRISTINA MARTÍN Y SERGIO MORENO
Instituto de Microbiología Bioquímica
Dpto. de Microbiología y Genética
CSIC/Universidad de Salamanca





El gen rum1$^+$ es un regulador esencial de la fase G1 del ciclo celular en S. pombe. *La fotografía superior corresponde a células mutantes para el gen wee1. La falta de nutrientes, o mutaciones en inhibidores de mitosis como el gen wee1, causan una entrada prematura en mitosis. Las células resultantes son de tamaño inferior al requerido para pasar por "arranque". Esto produce un aumento de células en fase G1, que tienen que crecer hasta alcanzar el tamaño necesario para volver a pasar por el punto de restricción. En estas condiciones, el gen rum1$^+$ es imprescindible para mantener las células antes de "arranque". Pero si estas células (*fotografía inferior*) no tienen rum1$^+$ pasan por "arranque" inmediatamente después de la mitosis y, como consecuencia, se produce una pérdida de masa en cada ciclo que conlleva la muerte celular*

De cerca

Fotos y texto: Kōji Nakamura

Con el pabellón en alto

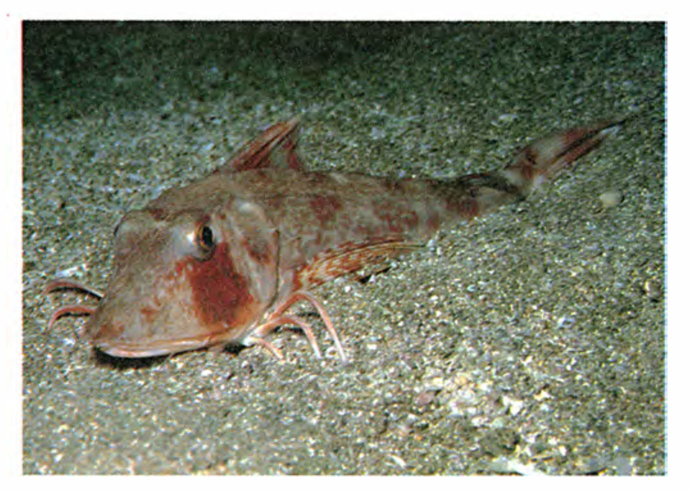
Todos los biólogos marinos han soñado alguna vez que conocían las raciones del pastel energético que se reparten los integrantes de una comunidad. Identificaban los componentes y parámetros y destejían, en brazos de Morfeo, la trama de las interrelaciones. Vana ilusión. Algunos, al despertar, se consolaban agregándose a la fila de quienes, *à la mode*, practican el juego de la biodiversidad y el conservacionismo, clamando contra las contaminaciones del litoral o del mar abierto.

En las aguas someras sublitorales de mi país abundan las laminarias, hasta el punto de constituir el foco principal de la producción primaria, algas que abastecen a un sinfín de peces. A ellas les vienen dedicando los ecólogos nipones un esfuerzo notable. Pero a mí no me preocupan tanto los aspectos doctrinales de la producción primaria o de otros niveles de la pirámide trófica cuanto la lucha por la vida de esta o aquella especie. Por ejemplo, la del dactilopteriforme de la fotografía.

Algo cabezón, protege su cuerpo longilíneo con escamas escuteladas. Presenta libres los últimos radios de la aleta pectoral, sobre los que, dicen los pescadores, "camina" por el sustrato. Carece de línea lateral. Si se le sorprende, despliega las aletas a modo de estandartes, llenos de un colorido que deja atónito, e inmóvil por consiguiente, al agresor. Menos mal que mi cámara no se arredró.

FOTO DE LA IZQUIERDA
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 8
exposición: 1/60 de segundo
película: ISO = 25

FOTO DE LA DERECHA
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 8
exposición: 1/60 de segundo
película: ISO = 25







Emoción, memoria y cerebro

¿Cuáles son las vías nerviosas que subyacen en la formación de recuerdos relacionados con el miedo y otras experiencias emotivas ancestrales?

Joseph E. LeDoux

A pesar de la atención que, a lo largo de milenios, han recibido las diversas formas de emoción que experimenta el hombre, seguimos sin encontrar una explicación fisiológica satisfactoria de este rincón de nuestra experiencia. Tampoco es de hoy el interés de los neurólogos por las bases de la percepción, la memoria y otros procesos cognitivos, quienes, sin embargo, han dejado bastante de lado la función del cerebro en las emociones.

De unos años a esta parte se ha despertado especial interés por tan misterioso dominio de la mente. Impulsados por los avances que se han producido en el terreno de las bases nerviosas del conocimiento y la creciente profundización en la anatomía y fisiología del cerebro, los investigadores han comenzado a enfrentarse con el problema de las emociones. Un área de estudio particularmente gratificante ha sido la concerniente a la exploración de las relaciones entre memoria y emociones. La inquisición ha abordado, sobre todo, lo referido a un tipo especial de emoción —el miedo— y la manera en que los estímulos (o sucesos), a través de experiencias individuales de aprendizaje, evocan ese estado. Se ha conseguido determinar el proceso mediante el cual el cerebro configura nuestro modo de crear recuerdos sobre ese fenómeno emocional, básico y significativo. A dicho proceso lo denominamos "memoria emocional".

Acotando las vías nerviosas mediante las cuales una determinada situación provoca que un sujeto aprenda a temer, esperamos esclarecer los mecanismos generales de esta forma de memoria. Cuanto sabemos sobre la asociación cerebral de memoria y emoción lo hemos aprendido, en buena medida, estudiando el condicionamiento del miedo. En este proceso, el sujeto, una rata por lo común, oye un ruido o percibe un destello de luz que se acompaña de una descarga eléctrica, suave y de breve duración, aplicada a una de las patas. Después de unas cuantas excitaciones, la rata responde automáticamente al sonido o a la luz, incluso en ausencia del estímulo de la descarga. Sus reacciones son típicas de una situación de amenaza: el animal se queda paralizado, la presión y el ritmo cardíaco se elevan y se asusta. De acuerdo con la terminología al uso, el ruido o el destello es un estímulo condicionado y la reacción de la rata es una respuesta condicionada; comporta ésta cambios fisiológicos y de comportamiento fácilmente mensurables.

No se tarda mucho en inducir en la rata un condicionamiento así; tampoco en el hombre. Basta en ocasiones un solo episodio de asociación de descarga eléctrica y sonido o destello para provocar el efecto condicionado. La reacción de temor permanece bastante tiempo. Si sometemos el animal a repetidos ensayos de sonido o luz sin el acompañamiento de la descarga, remite la respuesta. Hablamos entonces de extinción. Ahora bien, numerosos datos de diversa índole sugieren que esta alteración del comportamiento no obedece tanto a una eliminación del recuerdo emocional cuanto al control de la respuesta de temor por parte del cerebro. En ese orden, una respuesta de temor que se diría extinguida puede recuperarse espontáneamente o reinstaurarse mediante un nueva experiencia estresante de escaso relieve. Del mismo modo, la tensión puede instar la reaparición de fobias en personas que han respondido bien al tratamiento. Esta reaparición demuestra que la memoria emocional que subyace en las fobia pasó a un estado de latencia.

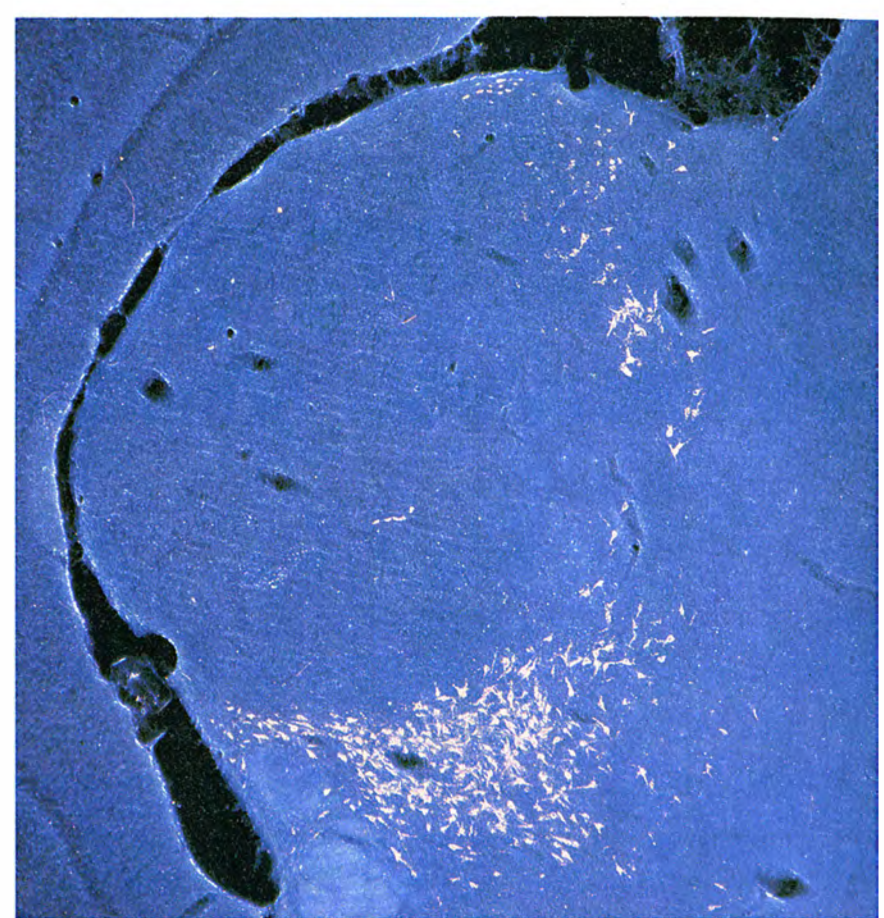
El condicionamiento del miedo ha resultado ser un buen punto de partida en la investigación de la memoria emocional por varias razones. En primer lugar, se da en animales de muy diversas especies: mosca del vinagre, gasterópodos, aves, lagartos, peces, conejos, ratas, monos y personas. Aunque nadie afirme que los mecanismos sean idénticos en todas las especies, parece claro que las vías son semejantes en los mamíferos y, posiblemente, en los vertebrados. Por ello nos inclinamos a pensar que la mayoría de los datos obtenidos en animales son aplicables al hombre. Además, los estímulos que se utilizan en este tipo de condicionamientos no son señales que las ratas —o el hombre, para el caso— encuentren de manera habitual. La novedad e irrelevancia de los sonidos y destellos empleados excluye la posibilidad de que los animales hayan desarrollado ya reacciones emocionales frente a ellos. Se trata, pues, de habérselas con observaciones relativas al aprendizaje y la memoria en funcionamiento. Al mismo tiempo, esos estímulos no requieren ningún proceso complicado de reconocimiento por parte del cerebro. Los estímulos nos permiten, pues, estudiar los mecanismos de las emociones de una forma bastante directa. Por último, nuestro estado actual de conocimientos sobre las vías nerviosas implicadas en el procesamiento de la información visual y acústica constituye un excelente punto de partida para examinar el fundamento neurológico del miedo que esos estímulos provocan.

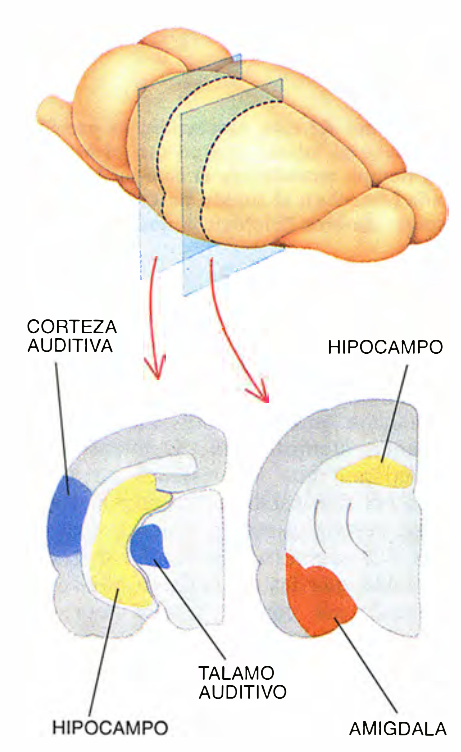
He venido trabajando en las bases cerebrales del aprendizaje del miedo. Doy por supuesto que el condicionamiento del miedo se produce porque la descarga modifica la vía en que las neuronas de ciertas regiones del cerebro interpretan el estímulo sonoro. Se acepta que esas neuronas críticas residen en la vía a través de la

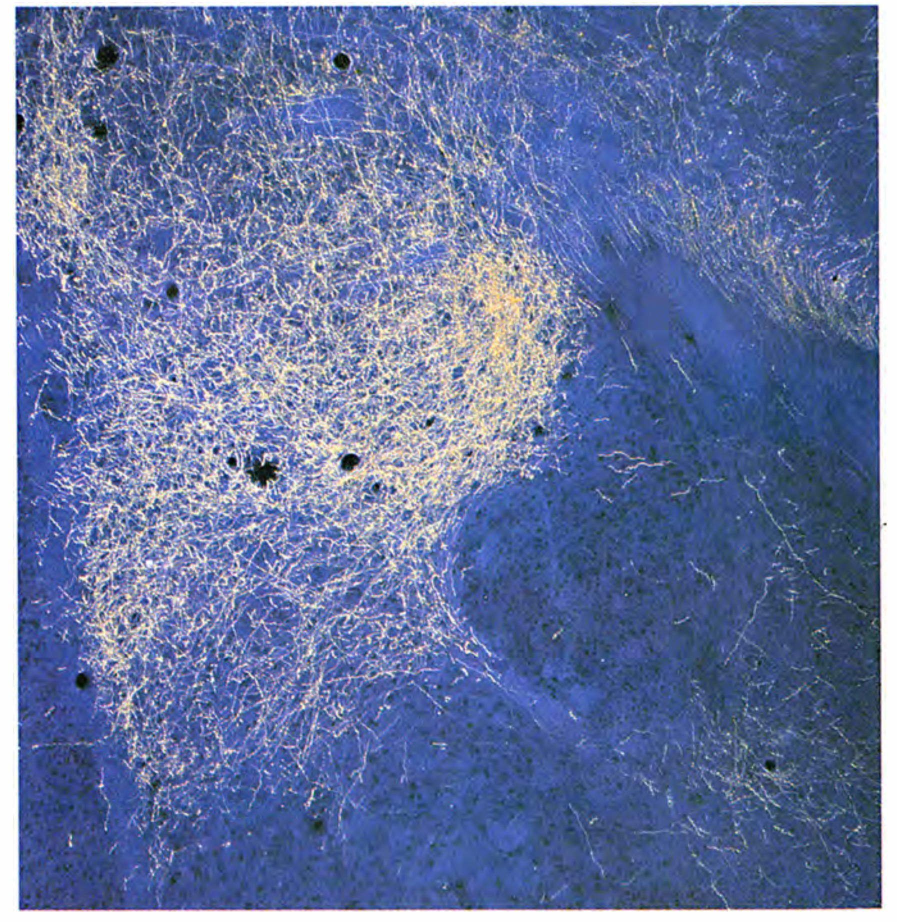
JOSEPH E. LEDOUX, profesor de la Universidad de Nueva York, lleva años investigando las bases nerviosas de la memoria y la emoción, por cuyos trabajos ha recibido numerosos galardones.

cual el sonido desencadena la respuesta condicionada.

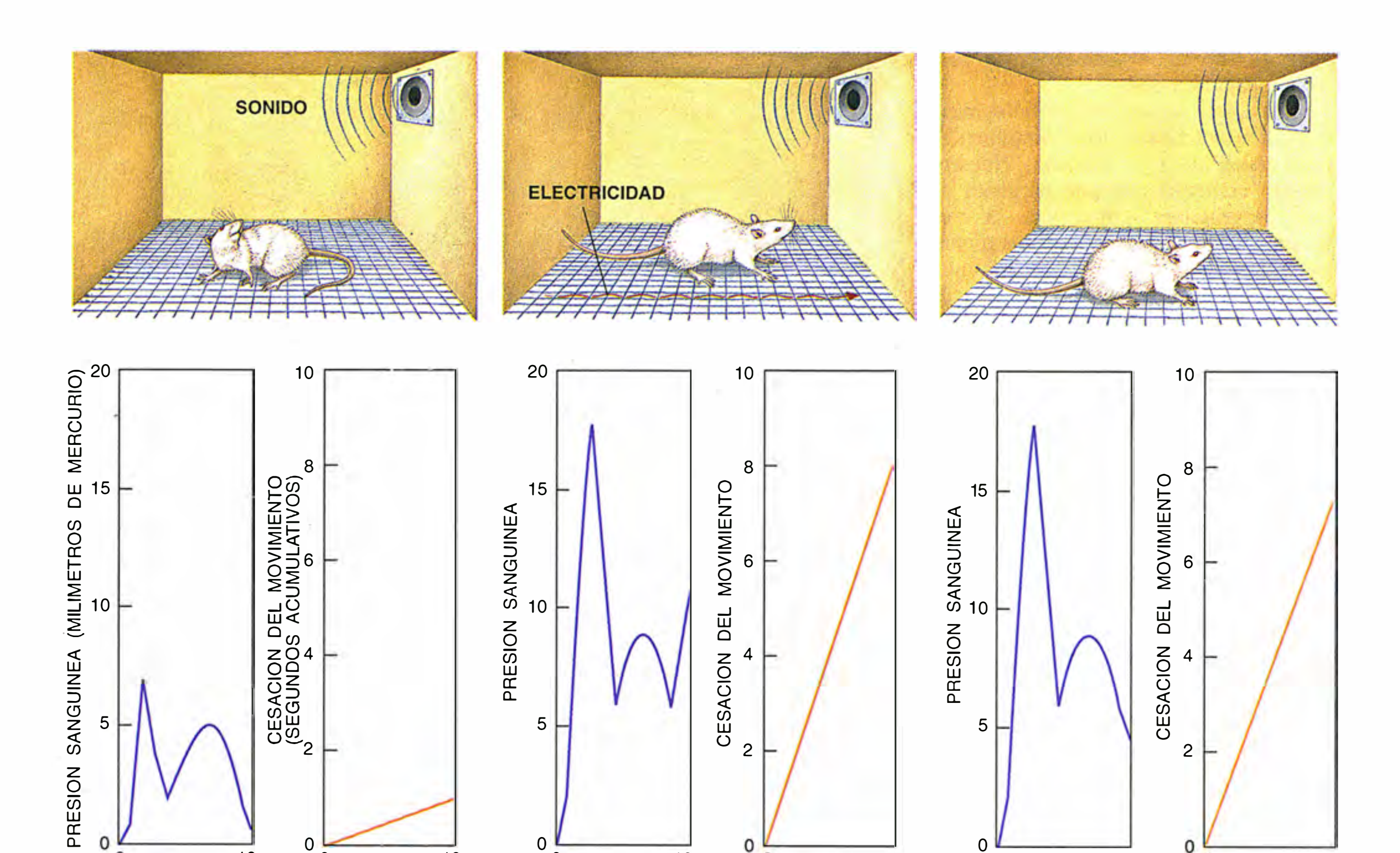
A lo largo de los diez últimos años, se han identificado los componentes principales de este sistema. Nuestro estudio comenzó con una pregunta de escueta sencillez: ¿interviene la corteza auditiva en el condicionamiento del miedo auditivo? Lo mismo que en otros sistemas sensoriales, en la vía auditiva la corteza es el nivel superior de todo el proceso; culmina una secuencia de pasos neurales que se inicia en los receptores situados, en este caso, en el oído. Si la lesión provocada en zonas de la corteza auditiva, o la extirpación de las mismas, impidiera el condicionamiento del miedo, podríamos entonces concluir que la región es necesaria para esa actividad. También podríamos deducir que el siguiente paso en la vía del condicionamiento sería una eferencia de la corteza auditiva. Pero nuestros experimentos, centrados en las lesiones, confirmaban que la corteza no es imprescindible para aprender muchas cosas sobre estímulos acústicos elementales.







1. ANATOMIA DE LA EMOCION y regiones cerebrales que abarca. Se muestran aquí las correspondientes a la rata (*arriba*); amígdala, tálamo y partes de la corteza interaccionan para crear recuerdos sobre experiencias de miedo asociadas con un sonido. Se han acotado ya las áreas donde se aprende el miedo y después se recuerda: ciertas partes del tálamo (*rosa claro, arriba a la derecha*) establecen comunicación con áreas de la amígdala (*amarillo pálido, abajo a la derecha*) que procesan los estímulos sonoros, causantes del miedo.



2. CONDICIONAMIENTO CLASICO DEL MIEDO mediante asociación de un sonido con una ligera descarga eléctrica en una pata de la rata. En un grupo de experimentos, la rata oye un sonido (*izquierda*), que tiene escaso efecto sobre la presión sanguínea del animal o sus pautas de movimiento. A continuación, oye el mismo sonido, asociado a una descarga (*centro*). Después de varias repeticiones de esta asociación, la presión sanguínea de la rata se eleva al mismo tiempo que el animal se queda inmóvil cierto tiempo cuando oye el sonido. La rata ha quedado condicionada (*derecha*): el sonido basta por sí solo para producir los mismos cambios fisiológicos que con el sonido y la descarga juntos.

Decidimos provocar lesiones en el tálamo y mesencéfalo auditivos, situados debajo de la corteza auditiva. Estas dos áreas procesan señales auditivas: el mesencéfalo proporciona la entrada principal hacia el tálamo; y el tálamo suministra la entrada principal hacia la corteza. El daño infligido en ambas regiones elimina la susceptibilidad de la rata para el condicionamiento. De ese hallazgo se desprendía que el estímulo sonoro se transmite a través del sistema auditivo hasta el nivel del tálamo auditivo, sin que resulte necesario que alcance la corteza para que se produzca el condicionamiento del miedo.

Sabíamos que las fibras nerviosas primarias que transmiten señales desde el tálamo auditivo se extienden hasta la corteza auditiva. Por ello, David A. Ruggiero, Donald J. Reis y el autor volvieron a considerar el asunto. Vimos, en efecto, que las células de algunas regiones del tálamo auditivo proyectan fibras que alcanzan zonas subcorticales. ¿Podrían ser algunas de estas proyecciones nerviosas las conexiones mediante las cuales el estimulo desencadena la respuesta que identificamos con el miedo? Sometimos a prueba esta hipótesis dañando cada una de las regiones subcorticales a las que llegan estas fibras. Sólo fue positiva la lesión que afectó a la amígdala.

Esa observación nos ofreció un lugar donde ubicar nuestros hallazgos, dentro del cuadro ya aceptado del procesamiento de las emociones. Desde hacía tiempo, la amígdala se consideraba región crucial por lo que atañía a diversas formas del comportamiento emocional. En 1979, el grupo de Bruce S. Kapp dio a conocer que las lesiones producidas en el núcleo central de la amígdala bloquean una respuesta condicionada del ritmo cardíaco en el conejo tras haber éste recibido una descarga asociada con un sonido. El núcleo central conecta con áreas del troncoencéfalo implicadas en el control del ritmo cardíaco, respiración y vasodilatación. El trabajo de Kapp sugería que el núcleo central era un eslabón decisivo del sistema a través del cual se expresan las respuestas condicionadas autónomas.

De forma similar, descubrimos que las lesiones del núcleo evitaban la elevación de la presión sanguínea y limitaban la capacidad de la rata de quedarse quieta en presencia del estímulo atemorizador. Demostramos, asimismo, que las lesiones de áreas con las que establece contacto el núcleo central eliminaban una u otra de las dos respuestas. Michael Davis determinó que las lesiones en el núcleo central, así como en otra área del troncoencéfalo hacia la que se proyecta el núcleo central, retraían una nueva respuesta condicionada: la reacción potenciada de sorpresa que se produce cuando el animal siente miedo.

Varios laboratorios que utilizan especies diferentes y métodos diversos en sus mediciones de la reacción de miedo coinciden en considerar el núcleo central un componente clave en los circuitos del condicionamiento del miedo. Proporciona conexiones a las diversas áreas del troncoencéfalo involucradas en el control de una gama de respuestas.

Pese a tales avances en el conoci-

miento de la amígdala, falta mucho por saber a propósito de la vía. ¿Llega la señal sonora directamente al núcleo central desde el tálamo auditivo? No. El núcleo central recibe proyecciones de áreas talámicas cercanas a la parte auditiva del tálamo, pero no de dicha parte. Un área enteramente diferente de la amígdala, el núcleo lateral, recibe señales del tálamo auditivo. Las lesiones que provocamos en el núcleo lateral impidieron el condicionamiento del miedo. El hecho de que el núcleo lateral reciba información directa del sistema sensorial nos hace suponerlo interfaz sensorial de la amígdala en el condicionamiento del miedo. El núcleo central constituye, tal parece, la interfaz de los sistemas que controlan las respuestas.

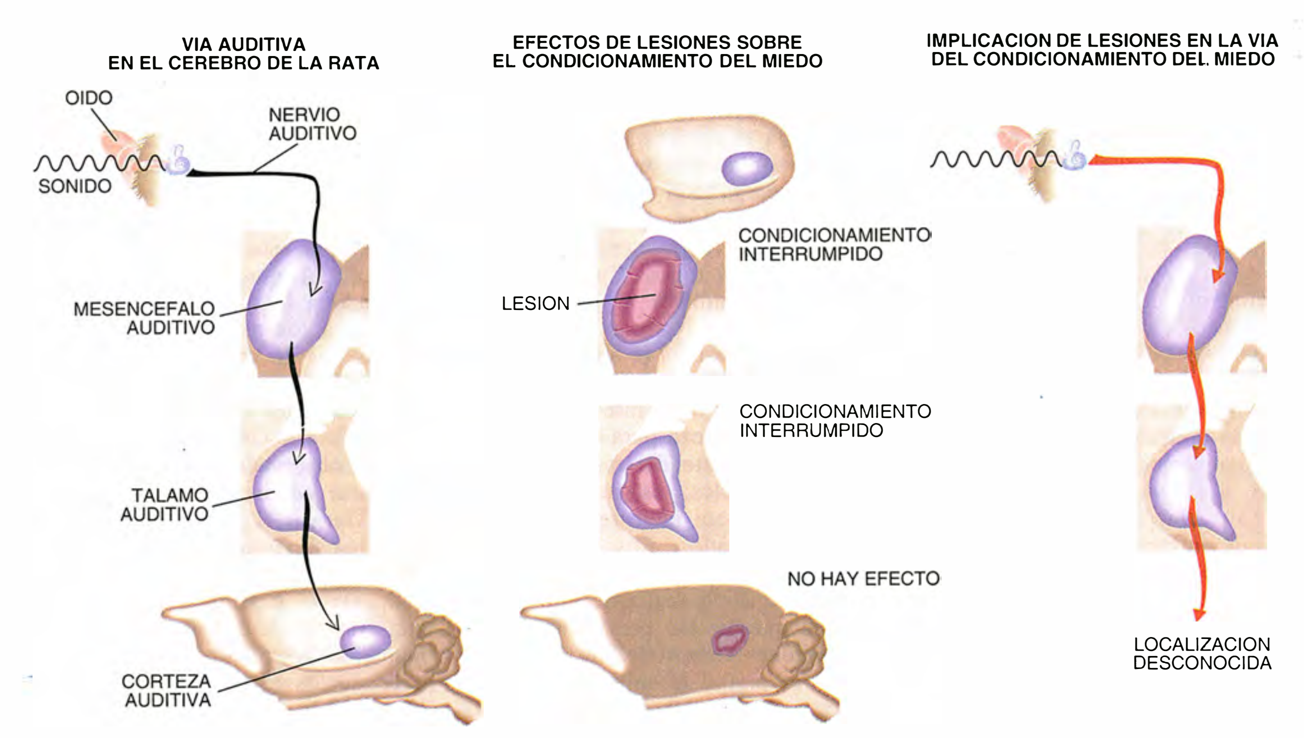
Estos hallazgos prometían desplegarnos el mapa entero de la vía de la respuesta ante el estímulo. Pero seguíamos ignorando de qué modo la información recibida por el núcleo lateral llegaba al núcleo central. Estudios anteriores habían sugerido que el núcleo lateral se proyecta directamente hacia el núcleo central; pero las conexiones eran harto escasas. En sus trabajos con monos, David Amaral y Asla Pitkanen, del Instituto Salk en San Diego, demostraron que el núcleo lateral se extiende directamente hasta un lugar adyacente, el núcleo basal o basolateral, que, a su vez, se proyecta hacia el núcleo central.

Claudia R. Farb y C. Genevieve Go, de mi laboratorio, en colaboración con Lisa Stefanacci y otros del Instituto Salk han puesto de manifiesto la existencia de las mismas conexiones en la rata. Estas conexiones forman contactos sinápticos, esto es, ponen en comunicación directa unas neuronas con otras. En virtud de tales contactos, la información que alcanza el núcleo lateral puede influir en el núcleo central a través del núcleo basolateral. El núcleo lateral puede influir en el núcleo central a través del núcleo basal o basomedial. Existen, pues, muchas posibilidades de que el núcleo lateral se comunique con el núcleo central, una vez que ha recibido un estímulo.

El significado emocional de dicho estímulo está determinado por el sonido y por el ambiente en que se produce. La rata ha de aprender, por tanto, no sólo que un sonido o una señal visual es peligrosa, sino también qué condiciones deben darse para que lo sean. Con Russell G. Phillips he examinado la respuesta de ratas a la cámara, o al contexto, en que han adquirido el condicionamiento. Y hemos observado que las lesiones de la amígdala bloqueaban la respuesta de los animales tanto al tono como al entorno. En cambio, las lesiones del hipocampo —región cerebral implicada en la memoria declarativa— impedían sólo la respuesta al entorno. (La memoria declarativa implica información explícita, accesible de manera consciente, así como la memoria espacial.) Por aquel entonces, Michael S. Fanselow y Jeansok J. Kim descubrían que las lesiones del hipocampo producidas después de operado el condicionamiento impedían la expresión de las respuestas al entorno.

Estos hallazgos eran congruentes con la opinión según la cual el hipocampo desempeña un papel importante en el procesamiento de información compleja, tales como los detalles sobre el entorno espacial donde tiene lugar la actividad. Con Phillips he demostrado también que el subículo, región del hipocampo que se proyecta a otras áreas del cerebro, se comunica con el núcleo lateral de la amígdala, conexión que nos induce a pensar que la información contextual puede adquirir una significación emocional, de la misma manera que otros eventos, mediante la transmisión al núcleo lateral.

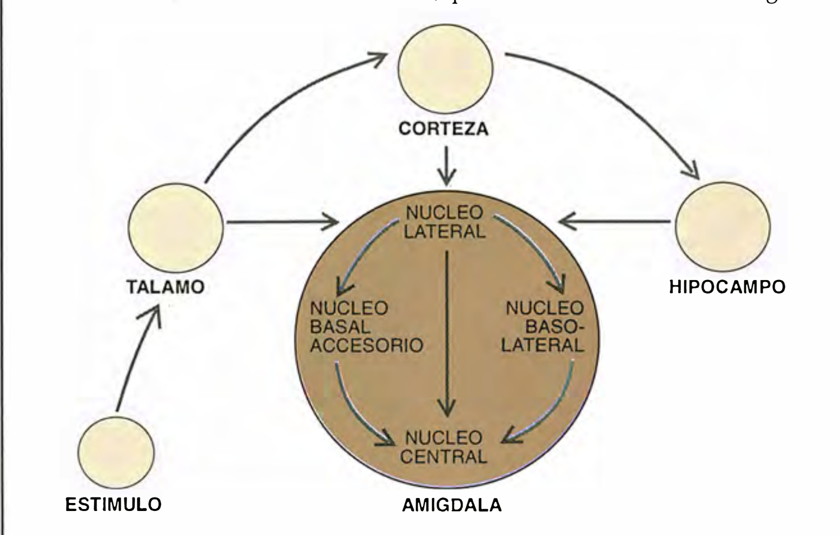
Aunque nuestros experimentos habían identificado una vía sensorial subcortical que originaba un condicionamiento del miedo, no descartábamos la corteza. Sigue debatiéndose



3. LESIONES CEREBRALES, decisivas para determinar las zonas comprometidas en las sensaciones y aprendizaje del miedo. Cuando el cerebro de la rata procesa un sonido, las señales recorren una vía que va del oído al mesencéfalo, al tálamo y a la corteza (*izquierda*). Las lesiones pueden provocarse en diversos puntos de la vía auditiva para determinar las áreas imprescindibles para el condicionamiento del miedo (*centro*). Si la lesión está localizada en la corteza, no se altera la respuesta de miedo; por tanto, serán otras las áreas del cerebro que reciban eferencias del tálamo y estén implicadas en el establecimiento de recuerdos sobre experiencias que estimulan el miedo (*derecha*).

Estructura de la amígdala

Se admitía desde hace tiempo la participación de la amígdala en el comportamiento emocional. Los experimentos recientes con roedores han puesto de manifiesto las estructuras de ese órgano que intervienen en el aprendizaje del miedo y en su recuerdo. El núcleo lateral recibe aferencias de las regiones sensoriales del cerebro y transmite estas señales a los núcleos basolateral, basal accesorio y central. El núcleo central establece conexión con el troncoencéfalo, produciendo cambios fisiológicos.



la interacción de mecanismos subcorticales y corticales en la emoción. Algunos creen que el acto cognitivo es un precursor vital de la experiencia emocional; otros piensan que la cognición —una supuesta función cortical— es necesaria para iniciar la emoción, o que el procesamiento emocional es un tipo de procesamiento cognitivo. Y hay otros, por fin, que ponen en duda que la cognición sea imprescindible para el procesamiento emocional.

A nosotros nos parecía evidente, aunque no decisiva, la implicación de la corteza auditiva en el establecimiento de la respuesta de miedo, al menos cuando se aplican estímulos auditivos elementales. Norman M. Weinberger ha demostrado que, en su reacción ante los sonidos, las neuronas de la corteza auditiva sufren cambios fisiológicos característicos en virtud del condicionamiento. Nos dice ese hallazgo que la corteza crea su propio registro de lo acaecido.

Lizabeth M. Romanski determinó experimentalmente que, en ausencia de corteza auditiva, la rata aprende a responder con una reacción de miedo ante un único tono. Pero si se eliminan las proyecciones del tálamo a la amígdala, bastan las proyecciones del tálamo a la corteza y de ahí a la amígdala. Romanski prosiguió hasta establecer que el núcleo lateral puede recibir aferencias del tálamo y de la corteza. Su trabajo anatómico en la rata complementa investigaciones anteriores realizadas con primates.

Dentro del grupo de Neil Schneiderman, de la Universidad de Miami, Theodore W. Jarrell y otros han demostrado que las lesiones de la corteza auditiva interrumpen el condicionamiento del miedo a uno de los dos estímulos asociados con la descarga eléctrica en la pata. El conejo expresaba la respuesta de miedo sólo ante el sonido que se había acoplado a la descarga. Sin embargo, después de la producción de lesiones en la corteza auditiva, los animales respondían a ambos tonos. Cuando faltaba la corteza auditiva y los animales dependían exclusivamente del tálamo y de la amígdala para el aprendizaje, los dos estímulos eran indistinguibles. De lo anterior cabe inferir que no se necesita la corteza para establecer un condicionamiento del miedo ante estímulos simples; es imprescindible, en cambio, para interpretar estímulos más complicados. Los hallazgos de Schneiderman encuentran apoyo en la investigación realizada con primates, en quienes las proyecciones desde regiones sensoriales de la corteza hasta la amígdala intervienen en el procesamiento del significado emocional de estímulos complejos.

Parte de este trabajo ha sido puesto en entredicho. Davis y su equipo han señalado que una lesión producida en una región de la corteza perirrinal —región de tránsito entre paleocórtex y neocórtex— interrumpe la expresión de una respuesta de miedo aprendida con anterioridad. Davis aduce que la corteza es el asiento de la vía preferida hasta la amígdala, y que las proyecciones talámicas no se utilizan normalmente durante el aprendizaje, a no ser que la corteza se lesione en el momento del aprendizaje. Nuestra idea acerca del efecto de las lesiones producidas después de que el aprendizaje ya ha tenido lugar es que impiden el almacenamiento y recuperación de la memoria a largo plazo. Esta interpretación parece también aplicable al trabajo de Davis según sugieren los estudios de Keith P. Corodimas, quien demostró que al menos parte del déficit puede superarse proporcionando claves recordatorias.

Desentrañados los mecanismos de adquisición del condicionamiento del miedo, nos propusimos averiguar cómo se establecen los recuerdos vinculados a emociones y su almacenamiento molecular. Con Farb demostré que el glutamato, aminoácido transmisor excitador, está presente en las células talámicas que llegan al núcleo lateral. Y en unión con Chiye J. Aoki, hemos comprobado su presencia en sinapsis del núcleo lateral. Dada la implicación de la transmisión por glutamato en la formación de la memoria, parece que andábamos por buen camino.

El glutamato se observó en el proceso de potenciación a largo plazo, o PLP, que se ha erigido en modelo de creación de recuerdos. Estudiado con particular ahínco en el hipocampo, este proceso implica un cambio en el rendimiento de la transmisión sináptica a lo largo de una vía nerviosa: las señales viajan con mayor rapidez por esta vía, una vez operada la PLP. El mecanismo parece estar asociado a la transmisión por glutamato y a los receptores de NMDA.

Trabajos de índole diversa han corroborado la participación de la PLP en la vía del condicionamiento del miedo. Marie-Christine Clugnet y yo hemos observado que la PLP podía inducirse en la vía talámico-amigdalina. Thomas H. Brown y Paul Chapman descubrieron la existencia de PLP en una proyección cortical a la amígdala. Davis y Fanselow, entre otros, han conseguido bloquear el condicionamiento del miedo mediante el bloqueo de los receptores de NMDA en la amígdala. Y Michael T. Rogan ha comprobado que se aviva el procesamiento de los sonidos por la vía tálamico-amigdalina, una vez inducida la PLP. El hecho de que la PLP aparezca en la vía del condicionamiento abre nuevas esperanzas de

llegar a comprender la vinculación de esa potenciación con la memoria emocional.

Para saber qué ocurría en las neuronas del núcleo lateral durante el aprendizaje, Fabio Bordi registró el estado eléctrico de neuronas de esa área cuando la rata del experimento percibía el sonido y recibía una descarga eléctrica. Vio con Romanski que casi todas las células que respondían a los estímulos auditivos respondían también a la descarga eléctrica. El componente básico del condicionamiento estaba, por tanto, presente en el núcleo lateral.

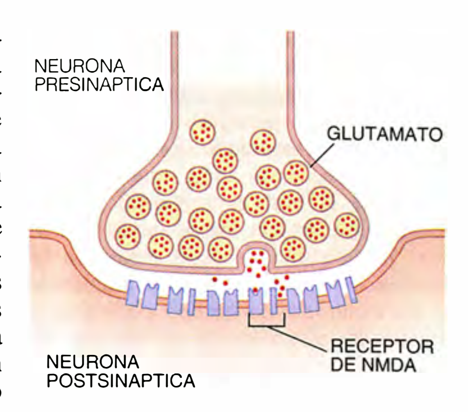
Bordi dividió en dos clases las células que se estimulaban acústicamente: las que lo hacían en virtud de su habituación y las que respondían impelidas por su propia naturaleza. Las primeras callaban si se trataba de sonidos repetidos; diríase que tenían por misión detectar sonidos nuevos o no habituales, y podrían dejar que la amígdala pasara por alto un estímulo convertido en familiar. El emparejamiento del sonido con la descarga podría reducir en estas células la habituación, permitiendo que la células respondieran a los estímulos significativos.

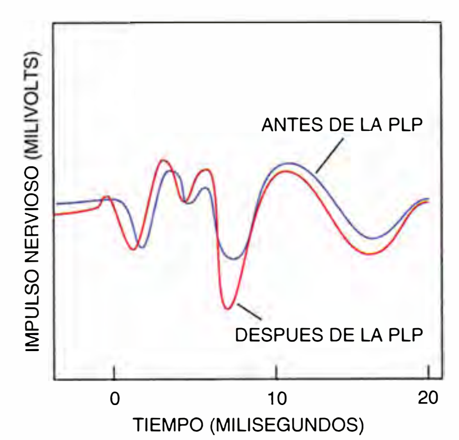
Las células que, por naturaleza, responden siempre presentan umbrales de intensidad: sólo los sonidos intensos pueden activarlas. Conviene resaltar ese dato, habida cuenta del papel que la intensidad del sonido puede desempeñar en la apreciación de la distancia. A un sonido de origen cercano se le supone, en potencia, más peligroso que a otro de fuente lejana. Un sonido vinculado a una descarga podría hacer que las células rebajaran su umbral, aumentando la sensibilidad de las células ante el mismo estímulo. Las células que, por naturaleza, responden siempre lo hacen con una sintonía más amplia. La unión de sonido y descarga podría hacer que las células respondieran a una gama más estrecha de frecuencias, o podría desplazar la sintonía hacia la frecuencia del estímulo. De hecho, Weinberger acaba de demostrar que las células del sistema auditivo alteran su sintonía para aproximarla al estímulo condicionado. Bordi y el autor han detectado ese efecto en células del núcleo lateral.

La permanencia manifiesta de estos recuerdos plantea una cuestión importante relacionada con la clínica: ¿podría eliminarse el aprendizaje emocional, o, al menos, recortarse? De acuerdo con lo señalado antes, resulta difícil desembarazarse de recuerdos emocionales; en el mejor de los casos, se puede conseguir mantenerlos velados. El trabajo que Maria A. Morgan lleva a cabo en mi laboratorio comienzan a arrojar algo de luz sobre la regulación cerebral de la expresión de las emociones. Morgan ha demostrado que, cuando se daña parte de la corteza prefrontal, se hace muy difícil anular la memoria emocional. Eso significa que las áreas prefrontales —posiblemente a través de la amígdala— controlan la memoria emocional y evitan que se produzcan respuestas emocionales cuando ya no son necesarias. A una conclusión semejante arribó el grupo de Edmund T. Rolls, de la Universidad de Oxford, en sus investigaciones sobre la actividad eléctrica de las neuronas de la corteza frontal de los primates.

Una variación funcional de la vía entre esta región de la corteza y la amígdala podría acarrear, en algunas personas, una mayor dificultad para cambiar su comportamiento emocional. El grupo de Davis ha visto que el bloqueo de los receptores de NMDA en la amígdala impide la extinción. De todo ello parece deducirse que la extinción es un proceso activo del aprendizaje. Al mismo tiempo, este tipo de aprendizaje podría hallar su sede en las conexiones entre la corteza prefrontal y la amígdala. Habrá que refinar los experimentos en ese sentido para obtener una respuesta definitiva.

Las ventajas que reporta la ubicación de una memoria emocional básica en la vía de la amígdala saltan a la vista. La amígdala es un lugar crítico de aprendizaje por su céntrica instalación entre estaciones de aferencias y eferencias. Cada una de las vías que conducen a la amígdala —tálamo sensorial, corteza sensorial e hipocampo— transporta una información especial hasta ese órgano. Las vías que se originan en el tálamo sensorial proporcionan sólo una ruda percepción del mundo exterior, pero, al implicar un solo nexo neural, son









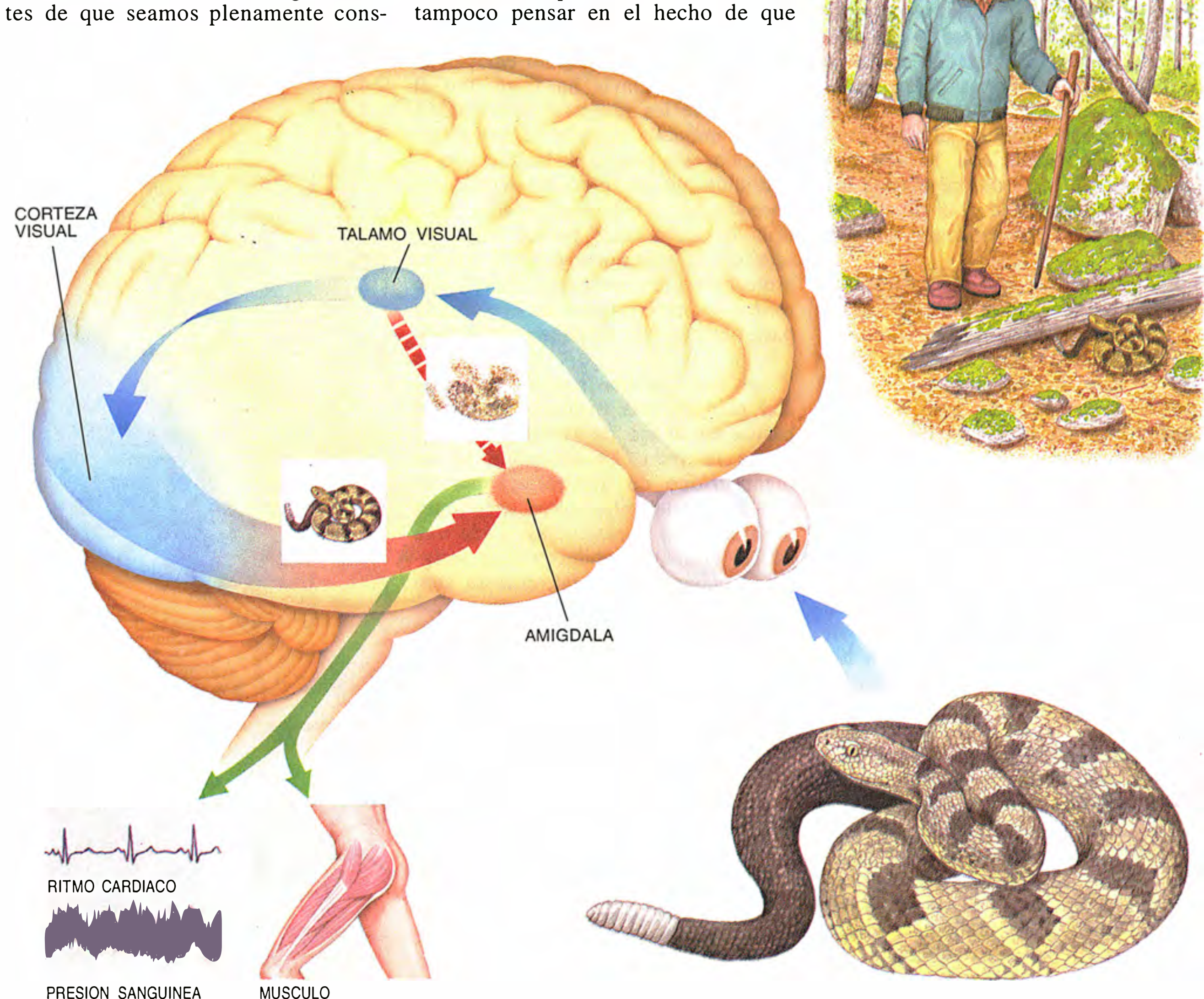
4. LA FORMACION DEL RECUERDO se ha vinculado al establecimiento de una potenciación a largo plazo, o PLP. En este modelo de memoria, el neurotransmisor glutamato y sus receptores NMDA (*arriba*) refuerzan la transmisión nerviosa. Una vez que se ha establecido la PLP, las mismas señales nerviosas desencadenan respuestas más intensas (*arriba, en el medio*). Los recuerdos emocionales podrían involucrar la existencia de PLP en la amígdala. La presencia de glutamato (*círculo rojo en la fotografía superior*) y de receptores de NMDA (*círculo rojo en la fotografía inferior*) se ha observado en la región de la amígdala donde el condicionamiento del miedo tiene lugar.

bastante rápidas. Por contra, las vías que se originan en la corteza ofrecen unas representaciones detalladas y precisas, que nos permiten reconocer un objeto por el sonido o por el aspecto. Ahora bien, estas vías, que van del tálamo a la corteza sensorial y a la amígdala, entrañan varios nexos neurales. Y cada uno de estos nexos en la cadena comporta un tiempo adicional.

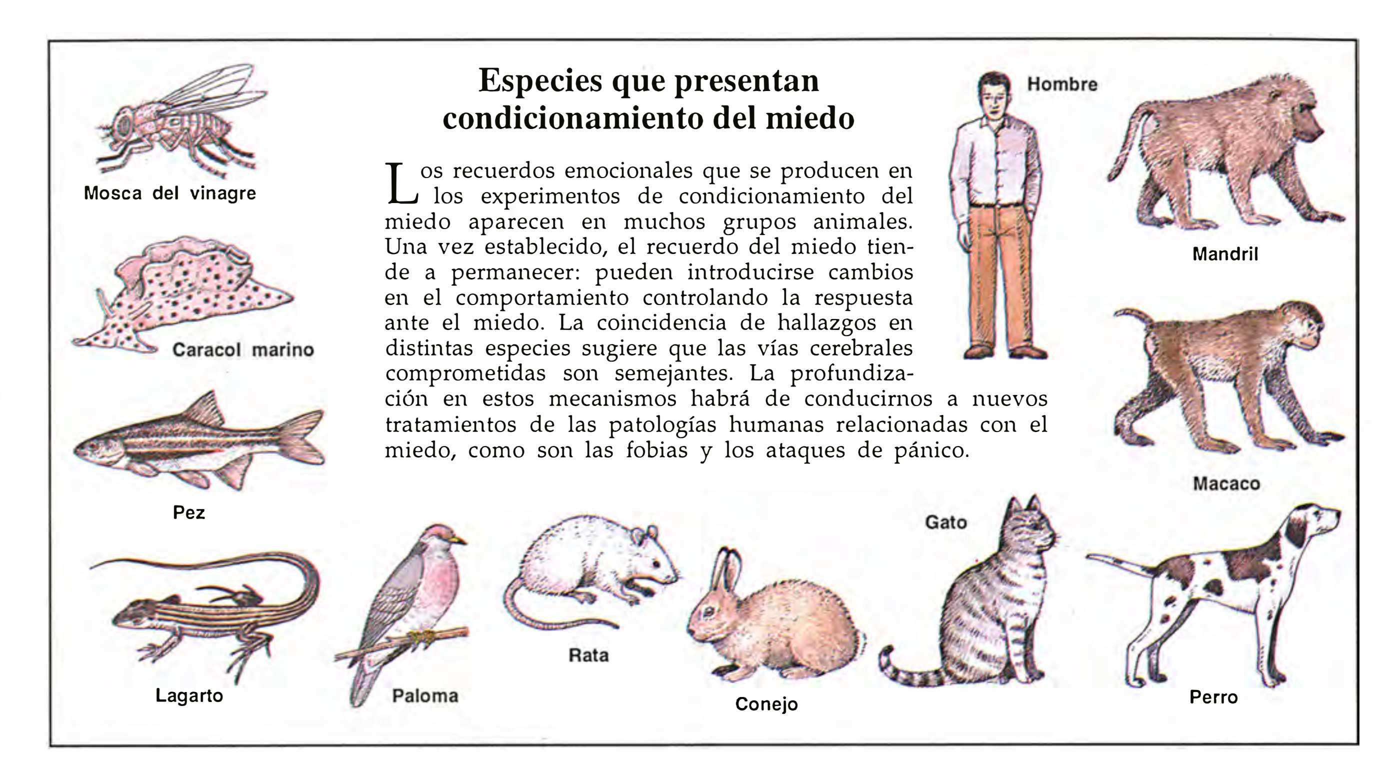
En el ahorro de tiempo podría descansar la razón de la existencia de dos rutas —una cortical y otra subcortical— para el aprendizaje emocional. Los animales, y también el hombre, necesitan disponer de un mecanismo de reacción rápida ante lo desagradable. El tálamo activa la amígdala casi al mismo tiempo que activa la corteza. Esta disposición podría permitir que las respuestas emocionales comiencen en la amígdala antes de que seamos plenamente conscientes de qué es lo que nos hace reaccionar o identifiquemos la sensación que estamos experimentando.

La vía talámica puede ser muy útil en situaciones que requieran una respuesta rápida. Fracasar en la respuesta ante el peligro resulta bastante peor que desencadenar una respuesta desproporcionada ante un estímulo intrascendente. Basta, por ejemplo, un ligero crujido de hojas cuando caminamos por el bosque para ponernos en alerta sin que hayamos tenido tiempo de identificar el origen de ese ruido. Igualmente, la vista de una estructura enrollada de curvas suaves en el camino es suficiente para que se despierte en nosotros la respuesta de un temor defensivo. No hace falta hacer un análisis detenido de si lo que tenemos delante de nosotros es o no una serpiente. Ni necesitamos tampoco pensar en el hecho de que las serpientes son reptiles y que con su piel se fabrican cinturones y zapatos elegantes. Todos estos detalles son irrelevantes, más aún, son un estorbo para la rapidez que se precisa en una reacción de la que puede depender la vida. Lo que necesita el cerebro es almacenar unas claves primitivas y detectarlas. Después, la coordinación de esta información básica con la corteza nos permitirá realizar la verificación (si es que se trata de una serpiente) o suspender la respuesta (gritos, hiperventilación o huida).

Aunque la amígdala almacena la información primitiva, no debemos con-



5. VIAS CORTICALES Y SUBCORTICALES del cerebro, cuyas características generales comunes conocemos gracias a los estudios sobre el sistema auditivo. Tales vías hacen posible una respuesta de miedo cuando en nuestro camino por el bosque avistamos una serpiente. Los estímulos visuales se procesan en el tálamo, que transmite una información rudimentaria, casi esquemática, a la amígdala (*rojo*). Esta transmisión rápida permite al cerebro que inicie la respuesta ante el posible peligro (*verde*). Entretanto, la corteza visual recibe información del tálamo y, con una elaboración más refinada de la percepción y más tiempo determina que la serpiente está, en efecto, en el sendero (*azul*). Esta información se retransmite a la amígdala, causando un aumento del ritmo cardíaco y de la presión sanguínea, así como una contracción de los músculos.



Especies que presentan condicionamiento del miedo

Los recuerdos emocionales que se producen en los experimentos de condicionamiento del miedo aparecen en muchos grupos animales. Una vez establecido, el recuerdo del miedo tiende a permanecer: pueden introducirse cambios en el comportamiento controlando la respuesta ante el miedo. La coincidencia de hallazgos en distintas especies sugiere que las vías cerebrales comprometidas son semejantes. La profundización en estos mecanismos habrá de conducirnos a nuevos tratamientos de las patologías humanas relacionadas con el miedo, como son las fobias y los ataques de pánico.

siderarla el único centro de aprendizaje. Compete a la red entera, y no sólo a uno de sus componentes, el establecimiento de los recuerdos. Las funciones de la amígdala, decisivas sin la menor duda, existen por mor del sistema al que pertenece.

Suele decirse que el recuerdo es el proceso mediante el cual reproducimos en la mente una anterior experiencia consciente. El aprendizaje original y la rememorización, en este caso, son eventos conscientes. Se ha determinado que la memoria declarativa está mediada por el hipocampo y la corteza. Pero la eliminación del hipocampo tiene escaso papel en el condicionamiento del miedo, salvo el condicionamiento dentro de un contexto.

Pero el aprendizaje emocional que se produce mediante el condicionamiento del miedo no es un aprendizaje declarativo, sino que está mediado por un sistema diferente; éste, con toda probabilidad, opera independientemente de nuestros procesos conscientes. La información emocional, aunque puede almacenarse sin la memoria declarativa, se guarda como un frío hecho declarativo. Por ejemplo, si una persona sufre un accidente de automóvil en el que la bocina quedó trabada, puede volver a sobresaltarse cuando oiga un bocinazo. Esa persona puede recordar los detalles del accidente, cuándo y dónde ocurrió, quiénes había y lo terrible que fue todo. Estos son recuerdos declarativos que dependen del hipocampo. La víctima puede ponerse tensa, ansiosa o deprimida, cuando se reactiva la memoria emocional a través del sistema amigdalino. El sistema declarativo ha almacenado el contenido emocional de la experiencia, pero sólo como un hecho.

Los recuerdos emocionales y declarativos se almacenan y se traen a la conciencia en paralelo; sus actividades se funden sin fisuras en nuestra experiencia consciente. Eso no significa que tengamos acceso consciente directo a la memoria emocional, sino que lo tenemos a las consecuencias (modo de comportarnos o sensación que experimentamos). Estas consecuencias se combinan con el recuerdo declarativo en el momento presente para originar un nuevo recuerdo declarativo. La emoción no es mero recuerdo inconsciente: influye poderosamente sobre la memoria declarativa y otros procesos del pensamiento. Como ha demostrado James L. McGaugh, la amígdala desempeña una función importante en la modulación del almacenamiento y en la intensidad de los recuerdos.

La distinción entre memoria declarativa y memoria emocional es importante. W. J. Jacobs y Lynn Nadel sostienen que somos incapaces de recordar sucesos traumáticos que acontecieron en los primeros momentos de la vida porque el hipocampo aún no había madurado hasta el punto de formar la base de una memoria conscientemente accesible. El sistema de la memoria emocional, que puede desarrollarse posteriormente, forma y almacena los recuerdos inconscientes de estos sucesos. Y por esta razón, el trauma puede afectar a la funciones mentales y de comportamiento en épocas posteriores de la vida, aunque estos procesos permanezcan inaccesibles a la conciencia.

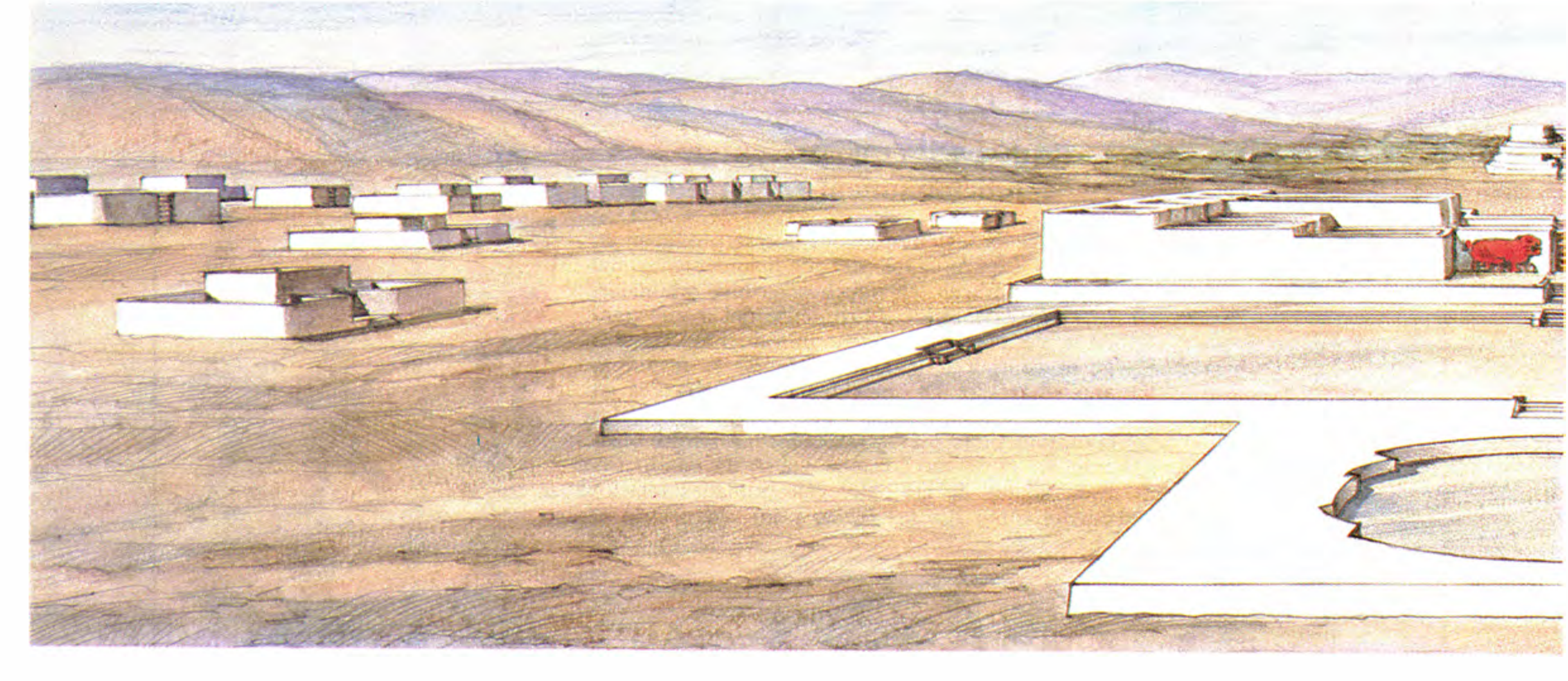
Debido a que el emparejamiento de un sonido con una descarga provoca respuestas condicionadas en toda la escala zoológica, el condicionamiento del miedo no puede depender de la conciencia. La mosca del vinagre y el caracol, por ejemplo, no se caracterizan precisamente por tener procesos mentales conscientes. Por eso considero el miedo un estado subjetivo de alerta producido como consecuencia de la reacción del cerebro ante un peligro. Sólo si el organismo posee mecanismos neurales desarrollados, el miedo consciente acompañará a la respuesta corporal. No quiere esto decir que le esté reservado al hombre experimentar la sensación de miedo, sino que la consciencia es un prerrequisito de los estados emocionales subjetivos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE AMYGDALA: NEUROBIOLOGICAL ASPECTS OF EMOTION, MEMORY AND MENTAL DYSFUNCTION. Dirigido por John P. Aggleton. Wiley-Liss, 1992.

BRAIN MECHANISMS OF EMOTION AND EMOTIONAL LEARNING. J. E. LeDoux en *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 2, número 2, págs. 191-197; abril de 1992.

THE ROLE OF THE AMYGDALA IN FEAR AND ANXIETY. M. Davis en *Annual Review of Neuroscience*, vol. 15, págs 353-375; 1992.



Ciudades andinas de la antigüedad

Hace unos 3800 años, Pampa de las Llamas-Moxeke y Taukachi-Konkan eran centros urbanos, nacidos de un plan diseñado, que daban vida a una comunidad numerosa y organizada

Shelia Pozorski y Thomas Pozorski

Durante más de medio siglo los arqueólogos sostuvieron que, en Perú, la "auténtica" civilización se inició con la cultura Chavín del llamado Horizonte Antiguo, que abarcó desde el año 1100 hasta el 250 a.C.

Sin embargo, a 350 kilómetros al norte de Lima, en un área triangular de llanos desérticos delimitada por las estribaciones andinas que se orientan hacia la costa, hay restos de ciudades cuya antigüedad se remonta otros 700 años más atrás. En dos de estos yacimientos venimos realizando campañas arqueológicas desde 1985. Se encuentran en el valle de Casma y nos hablan de una civilización compleja, con montículos de hasta 30 metros de altura coronados por templos, recintos administrativos, macrosistemas de riego y centenares de casas para ricos y pobres.

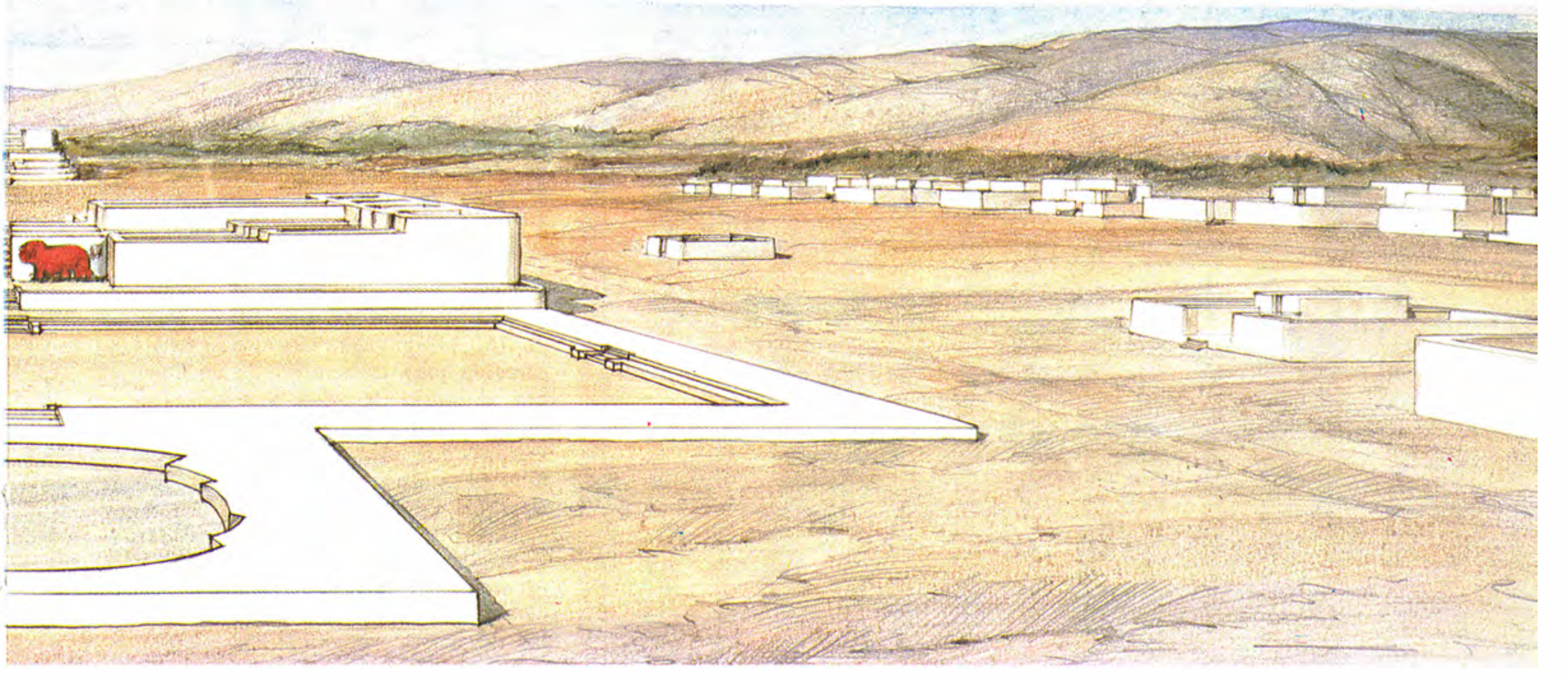
SHELIA POZORSKI y THOMAS POZORSKI han llevado a cabo campañas de excavaciones en Perú desde 1970. Ambos enseñan en la Universidad Panamericana de Texas.

Hasta 1980, cuando enviamos muestras de madera y de carbón vegetal procedentes de los yacimientos para su datación radiocarbónica, no quedó aclarada su ocupación durante el Período Inicial, entre el 2200 y el 1100 a.C., época en que aparecieron en la costa peruana la cerámica, el tejido y la agricultura de regadío a gran escala. (Este período corresponde aproximadamente al del Imperio Medio egipcio, pocos siglos después de la construcción de las grandes pirámides.)

Las peculiares condiciones climáticas de la zona han facilitado nuestro conocimiento de la cultura material de estos yacimientos. La última vez que llovió de forma significativa en Casma fue en 1983 y, antes, en 1925 y en 1891. (Muchas de las estructuras que excavamos carecían de techado, porque el clima lo hacía innecesario.) Ello explica el estado casi increíble de conservación de los materiales: los elementos textiles, la madera y hasta las hojas quebradizas, enterrados, han persistido en excelentes condiciones. Además, el saber que los agricultores practicaban el regadío, pues de otro modo el cultivo a gran escala hubiera sido imposible, proporciona a los arqueólogos pistas adicionales para reconstruir la estructura social de aquella cultura desaparecida.

En sus años de apogeo, Pampa de las Llamas-Moxeke, situada en el brazo meridional del valle de Casma, fue un centro floreciente que albergaba a unas 2500 personas en un área de dos kilómetros cuadrados. Dos elevaciones dominaban el asentamiento, Moxeke al sur y Huaca A al norte. Situadas una frente a la otra, se extendía en medio una serie de plazas simétricas que constituía el eje central en torno al cual se orientaban la mayoría de los edificios públicos.

Había, en los costados de ese eje, más de 110 edificios administrativos, de tamaño intermedio, dispuestos en filas paralelas. En su mayoría, miraban hacia el centro del poblado; en su mayoría también, eran pequeños montículos, a modo de versiones en miniatura de Huaca A. Se perciben rastros de "reestructuraciones urbanas": demolición de casas de bajo nivel social para ganar espacio y construir nuevas



alineaciones de montículos de tamaño intermedio, algunos de los cuales nunca se terminaron.

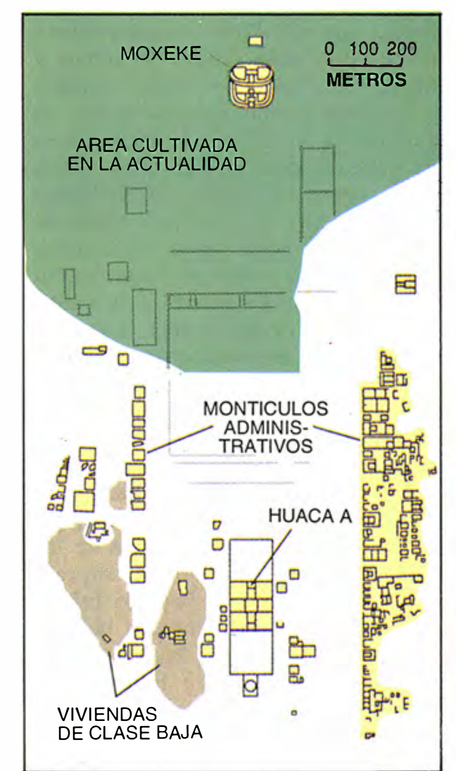
Moxeke, un montículo en horquilla con una anchura de 160 metros, una longitud de 170 y una altura de 30, sirvió probablemente de templo, donde se celebraban ceremonias destinadas a las multitudes apiñadas en las plazas circundantes. Hasta Huaca A (119 metros de ancho, 136 de largo y 15 de alto) se llegaba atravesando plazas de menor tamaño. Sin embargo, debido a la inclinación norte a sur del terreno, los puntos más altos de ambos montículos parecen encontrarse a la misma altura. Al nordeste de Huaca A se encuentra una plaza circular hundida. De tales características arquitectónicas participan muchos de los yacimientos de este período.

Todos los detalles arquitectónicos nos hablan de una previa planificación. Así, la simetría interna de los edificios públicos: especular en las dos mitades del montículo de Moxeke, tetralateral en Huaca A, que facilita el acceso directo desde la plaza situada en cada esquina.

En Huaca A abundan lo que parecen dispositivos de control: entradas, barreras y recintos amurallados, estructuras que guardan verosímil relación con su función de almacenaje. Pampa de las Llamas-Moxeke administraba muchas de las áreas circundantes en las cuales había los asentamientos menores que proporcionaban trabajo y bienes a sus habitantes. Las cámaras del montículo parecen haber almacenado, estimando a la baja, unos 4400 metros cúbicos de productos agrícolas y de objetos preciados.

Las hileras de montículos menores parecen haber servido como centros burocráticos de segundo orden. Residirían allí las oficinas y depósitos de almacenamiento, donde funcionarios de nivel medio se encargarían de adquirir, controlar y redistribuir la ingente cantidad de artículos almacenados y protegidos dentro de Huaca A.

Los edificios residenciales ocupan una pequeña fracción de la superficie total del poblado de Pampa de las Llamas-Moxeke. Hemos encontrado allí viviendas de clases altas y populares. Los funcionarios públicos ocupaban probablemente las mejores casas, con paredes de piedra y argamasa, en cuyo interior había cámaras de almacenamiento y hornacinas para guardar bienes personales. Por contra, la mayoría de la población, seguramente campesinos, jornaleros y artesanos, vivía hacinada en grupos irregulares de habitaciones, cuyas paredes, de caña o madera, estaban recubiertas de barro. Estas viviendas dejaron pocos restos arqueológicos, a excepción de algunos cimientos en piedra.



1. MONTICULO DE HUACA A, en el yacimiento de Pampa de las Llamas-Moxeke. Debió de resplandecer con un blanco cegador bajo el sol del desierto hace 3800 años. La estructura medía 15 metros de altura y almacenaba por lo menos 4400 metros cúbicos de objetos de valor y de mercancías. Formaba parte de una ciudad, construida de acuerdo con un proyecto (*derecha*), que albergaba más de 2000 personas. La entidad política a la que pertenecía Pampa de las Llamas-Moxeke estaba formada por más de media docena de ciudades, repartidas en 1000 kilómetros cuadrados. En esta región la civilización evolucionó durante un período de unos 4000 años (*abajo*).





2. DESIERTO de la costa peruana, malo para la agricultura y óptimo para la arqueología. Su aridez ha permitido la conservación, por más de 3000 años, de elementos perecederos.

Tras cuarenta años desde el descubrimiento de los yacimientos del valle de Casma nadie había caído en la cuenta de su verdadera antigüedad. Las investigaciones habían empezado en 1937, cuando Julio C. Tello excavó el montículo de Moxeke. Descubrió frisos de adobe de gran tamaño con esculturas en altorrelieve que representaban figuras humanas y grandes cabezas. Los frisos, situados en la parte frontal del montículo, se extendían a los lados. Habían tenido un brillante colorido en rojo, azul, verde, negro y blanco. Su hallazgo colocó al valle en el primer plano de los estudios sobre las civilizaciones andinas. Tello atribuyó esas representaciones espectaculares a la cultura de Chavín de las tierras altas, que caracterizaba el Horizonte Antiguo.

En 1980 examinamos este asentamiento, con otros cinco, en nuestro afán por establecer una cronografía precisa de los múltiples yacimientos "antiguos" del valle de Casma. ¿Dónde concentrar el esfuerzo arqueológico? Desde el principio, Pampa de las Llamas-Moxeke no dejó de sorprendernos. Pese a que el Período Inicial se define por la introducción generalizada de la cerámica, la que encontramos, no mucha, era harto tosca, sobre todo jarras sin cuello, modeladas a imagen de las calabazas que se usaban antes de la invención de los vasos de cerámica. Algunos elementos textiles reflejaban los balbuceos de ese arte, pero a su lado yacían tejidos elaborados (diríase que trenzados a mano más que en un telar), característicos de las culturas precerámicas. Abundaban restos de plantas cultivadas; sin embargo, en ninguna de nuestras más de 50 catas de prospección apareció el maíz, una constante en las poblaciones andinas posteriores.

Todos estos datos conferían una gran antigüedad al yacimiento de Pampa de las Llamas-Moxeke. Lo que no esperábamos eran los resultados que nos proporcionó la datación por carbono 14 de las muestras de carbón y de madera. Las nueve muestras iniciales (y las 15 recogidas durante los trabajos posteriores) arrojaron unas fechas entre el 2000 y el 1500 a.C., cientos de años antes del comienzo del Horizonte Antiguo.

Volvimos en 1985 para iniciar excavaciones sistemáticas. Nos concentramos en los dos tercios septentrionales del yacimiento; el tercio meridional había sufrido reocupaciones prehistóricas posteriores y se había visto afectado por la agricultura moderna. Realizamos sondeos en las elevaciones grandes, en los montículos intermedios y en los recintos cerrados, así como en las estructuras de habitación pequeñas e irregulares. Buscábamos pistas sobre las actividades desarrolladas en su interior y en su exterior, así como indicaciones que nos revelaran la función de las estructuras en el conjunto del asentamiento.

Escogimos Huaca A. La opción parecía obligada: la simetría tetralateral del montículo, perfectamente visible en superficie, significaba que la excavación de un cuadrante aclararía la estructura del edificio entero. Los propios muros aparecían dibujados en la superficie.

Los obreros peruanos contratados, entre 15 y 25, empezaron levantando enormes cantos rodados, desprendidos de las paredes. Los había hasta de 150 kilogramos. Con la carretilla ofrecida para el acarreo daban sombra al botijo de agua, y transportaban las piedras en sus espaldas, protegidas por almohadillas, de forma muy parecida a la que debieron utilizar los constructores de Huaca A.

Tras excavar más de dos metros, llegamos al suelo. El volumen de escombros caídos indicaba que las paredes de las habitaciones centrales, las de mayor tamaño, habían alcanzado por lo menos cinco metros de altura. En la parte alta de las paredes encontramos piedras que aún se conservaban fijas gracias al barro utilizado de argamasa; la cara lisa de la piedra constituía la parte visible del muro. Las filas superiores de las paredes se habrían levantado con ladrillos cónicos de adobe cuyo menor peso habría facilitado la construcción.

Las piedras de granito que formaban el muro estaban recubiertas con una espesa capa de argamasa compuesta por barro, sin refinar y repleta de las marcas de dedos características de los albañiles prehistóricos. La última capa de argamasa, de excelente calidad y rica en arcilla, se había desprendido en la parte superior de las paredes, pero se conservaba bien en las zonas bajas. El suelo aparecía finamente enlucido. Los restos de pigmento revelaban que las paredes y el suelo se habían pintado de blanco. El montículo entero refulgiría bajo el sol del desierto.

Logramos, por fin, delimitar las paredes del cuadrante norte de Huaca A, y con ello reconstruir la configuración de la cima del montículo. El edificio está constituido por la repetición, en tamaño variable, de una unidad de construcción básica: una sala cuadrada cuyas esquinas eran redondeadas por el exterior en tanto que por el interior dos eran redondeadas y otras dos formaban ángulo. A la entrada de cada habitación había un umbral en relieve y, en la parte superior de las paredes, amplias alacenas a una altura de 1,25 a dos metros del suelo. El piso de estas habitaciones cuadradas se cubría con esteras de junco tejido; todavía quedan las marcas en el enlucido arcilloso que revestía el pavimento.

Las unidades arquitectónicas mayores se encuentran a lo largo del eje nordeste-sudoeste del montículo;

las habitaciones van disminuyendo de tamaño conforme nos alejamos del centro. Los espacios entre las habitaciones cuadradas parecen haber servido de corredores de acceso. No solían tener ni esteras ni hornacinas.

Para averiguar cómo se aproximaba la gente a Huaca A y cómo circulaba por su parte más alta, limpiamos los atrios nordeste y sudoeste y las entradas del cuadrante norte. Descubrimos pruebas de un rígido sistema burocrático que controlaba y restringía el acceso al montículo. Sin embargo, los controles físicos hallados sugieren la presencia de una poderosa autoridad más que unas barreras materiales insuperables.

La intimidación (o inspiración) de un visitante empezaba en el momento en que subía cualquier escalinata hasta uno de los dos atrios. En ambos atrios, las paredes del fondo contenían magníficos frisos, a cada lado de la entrada central, que impresionarían al visitante. El friso correspondiente al atrio nordeste es el mejor conservado: esculpidos en bajorrelieve, en un sustrato arcilloso, se hallan los restos de dos inmensos felinos, probablemente jaguares.

Estas figuras, colosales y enfrentadas, de más de seis metros de altura por diez de longitud, flanqueaban la entrada nordeste del montículo. Los muros curvilíneos del patio resaltaban el efecto tridimensional de los felinos gigantescos. Restos de pigmento rojo sugieren que estuvieron brillantemente coloreados. Después de 3800 años sólo quedan los pies y la cola serpentiforme. Los perfiles de felino abundan, sin embargo, en el arte andino, lo que facilita la reconstrucción del cuerpo y la cabeza.

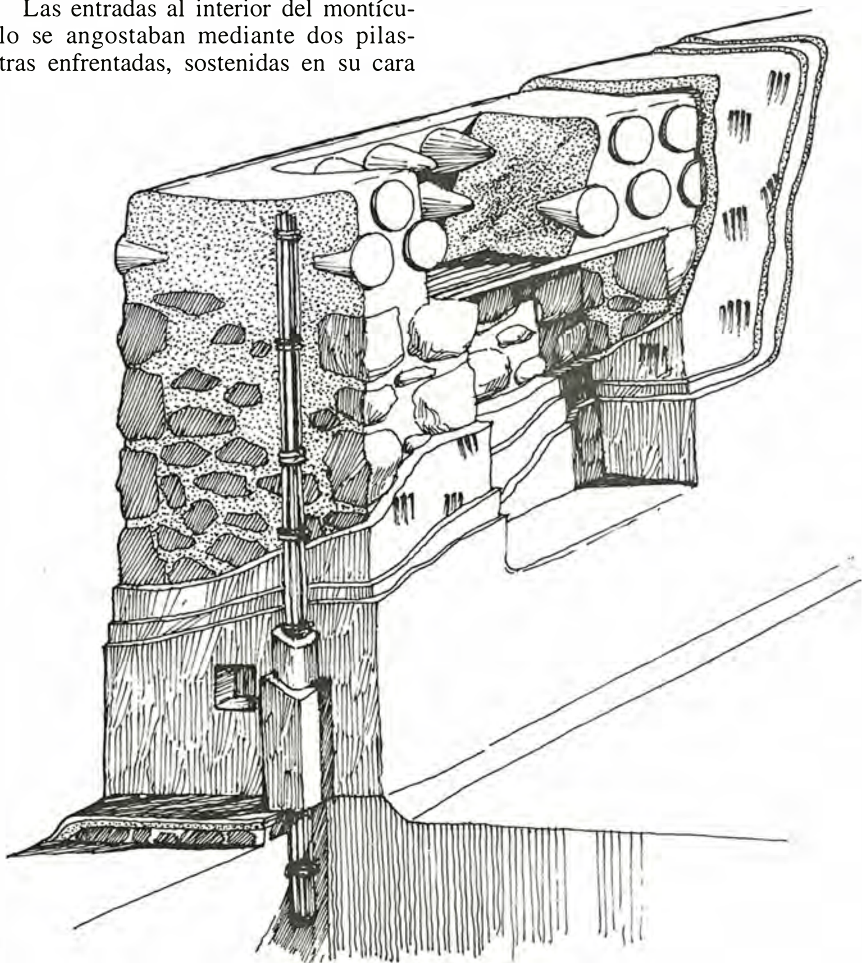
El área inmediatamente adyacente a la entrada presenta también relieves redondeados, cuyos círculos centrales encierran cuatro rectángulos de intervalo regular. El mismo diseño se itera en los extremos de las mazas que blandían los guerreros victoriosos en el cercano yacimiento de Cerro Sechín, lo que nos lleva a sospechar que se trata de un símbolo de autoridad.

En el atrio sudoccidental encontramos una piedra esculpida de unos 50 cm de longitud. Portaba tallada, en una de las caras, una serpiente de doble cuerpo; en un lateral se encuentra la marca de una mano derecha trabajada con sorprendente realismo. Esta piedra apareció acompañada por otras dos, más largas y que probablemente la sostenían formando un arco donde la serpiente miraría hacia afuera y la mano hacia abajo: un santuario, pues, o un altar. El rincón occidental del atrio alojaba también un par de piedras largas. Suponemos que formarían parte de un segundo arco; los restos abundantes de comida a su alrededor, ofrendas quizás, avalan la función sacra de las piedras.

Las entradas al interior del montículo se angostaban mediante dos pilastras enfrentadas, sostenidas en su cara interna por pequeñas ramas trenzadas en un haz del tamaño de un poste. Elementos de madera mayores, un artículo muy raro en el desierto, constituirían los dinteles de algunas entradas y de casi todas las alacenas u hornacinas que se abrían en las paredes del interior de las estancias. Una puerta de grandes tablones controlaba el acceso desde la entrada nordeste del montículo. Instalada en el lado contrario de la pared del friso, la puerta constaba de cuatro maderos verticales, de unos tres metros y medio de longitud, montados a cada lado de la entrada. Otros seis tablones, de 4,1 metros de largo, encajaban en el espacio libre que quedaba entre los maderos verticales y las paredes. Sus anchos y afilados extremos se alternaban para crear una barrera de entrada.

Otros accesos a Huaca A, 93 en total, estaban protegidos por uno o más mecanismos de cierre con barras o vallas, un sistema desconocido hasta entonces en los asentamientos peruanos antiguos. Cuando empezamos a limpiar estas entradas descubrimos en sus laterales unas hornacinas cuadra-





3. MUROS DE HUACA A, construidos de bloques de granito recubiertos con capas de barro y de un revestimiento final rico en arcilla. Las alacenas guardaban artículos de lujo. Las entradas a las habitaciones estaban flanqueadas por columnas de haces de plantas leñosas recubiertos de argamasa. Ladrillos cónicos de adobe (*izquierda*) remataban los muros.

das de piedra. Estas hornacinas siempre aparecían de dos en dos a cada lado, a medio metro más o menos del suelo; siempre, una de las dos era mucho más profunda que la otra.

La función de las hornacinas se puso de manifiesto a raíz de unas excavaciones simultáneas realizadas en un recinto cercano. Allí había una hornacina vacía, cuya profundidad era de 35 cm, enfrente de otra que aún contenía un palo de madera horizontal extendiéndose desde su centro. El poste estaba incrustado en los escombros, lo que nos obligó a limpiar la parte alta del muro; así descubrimos que estaba alojado en una cámara de piedra bien construida de más de dos metros. Una vez libre de escombros, lo empujamos a través de la abertura hasta que encajó en la cavidad de la pared opuesta, impidiendo el paso al recinto, como había hecho 3800 años atrás.

¿Por qué atrancaban todas las entradas? No hay indicios de que Huaca A estuviera habitado: ni hogares para cocinar, ni restos de comida. El montículo no era un palacio con extremas medidas de seguridad, ni una residencia real. Sí parece que se le destinara a almacenar mercancías y otros objetos de valor. Durante la excavación encontramos muy pocos útiles, lo que era de esperar, pues se los llevarían al abandonar el asentamiento. Quedaban fragmentos de tejido en las alacenas, procedentes de telas almacenadas y de recipientes fabricados con ellas. En las muestras recogidas en las alacenas sí apareció polen de algodón y de plantas comestibles (judías, patatas, batatas y cacahuetes), señal de que allí se guardaban. Pero, contrariamente a la opinión establecida de que el maíz era un elemento esencial en las civilizaciones del Nuevo Mundo, no había rastro de la gramínea. Miles de huesos de roedores confirman que se trataba de un almacén.

Hay pistas muy sugestivas sobre los posibles responsables de Huaca A y del control de las entradas y salidas de los productos. Los tejidos de mayor calidad se recuperaron en el montículo, al igual que muchas cuentas de turquesa y la única figurita de madera. Estos artículos abonan la hipótesis de que sólo la élite pudiente de la ciudad tenía fácil acceso a Huaca A; si las clases inferiores hubieran podido entrar, habríamos encontrado también restos de sus pertenencias.

La unidad constituida por la habitación cuadrada que dominaba Huaca A tiene su réplica en las líneas de edificios públicos de tamaño intermedio que cursan paralelas al eje principal del yacimiento. Cada recinto inmediato a la elevación principal está formado por una de estas unidades; el núcleo central de cada montículo pequeño de las alineaciones más largas consta de una sola habitación cuadrada. Estos edificios los ocuparían los burócratas que controlaban el trasiego de mercancías.

Detrás de algunos de los montículos pequeños quedaban restos de casas de los ricos. Igual que los montículos y los recintos, estas estructuras, bien edificadas con altas paredes de piedra enlucidas con barro, se alineaban también con el eje del yacimiento. Hay, además, pruebas claras de tareas domésticas. En una de las habitaciones aparece un gran hogar cuadrado, delimitado con piedras y con una oquedad circular para el fuego. En las casas de la élite se destinaron, para depósito, salitas que contenían tinajas, habitaciones con alacenas y cámaras subterráneas. Sin embargo, las residencias carecen de la simetría bilateral de la arquitectura pública y están rodeadas de desperdicios.

El interior de Huaca A y de los pequeños montículos y recintos se conservó limpio de productos de desecho domésticos. La basura proporciona, pues, la mejor información que tenemos sobre la vida de los burócratas. Dentro y alrededor de las casas de la élite aparecen con frecuencia fragmentos de figuritas de cerámica. También encontramos muchos trozos de morteros y manos de almirez de piedra; en ellos había aún restos del pigmento rojo.

De sumo interés, teniendo en cuenta el grado de burocracia del yacimiento, son lo que parecen cuños de sello y sellos cilíndricos de cerámica. Ninguno de los dos tipos acostumbra darse en el área andina. Aunque las culturas andinas posteriores utilizaban cuños para imprimir dibujos en la cerámica, no parece que ésta fuese su función en Pampa de las Llamas-Moxeke. En cambio, dos ejemplares contenían restos de pigmento rojo, lo que indica que sirvieron para aplicar una decoración cromática en superficies, tejidos o piel humana. Es posible que tales sellos fueran símbolo de poder y autoridad, igual que ocurría en los centros de las antiguas civilizaciones mediterráneas y del Próximo Oriente, en los que son más frecuentes.

Las casas donde vivía la gente común comparten algunos rasgos con la arquitectura doméstica de los grupos de élite; después de todo, realizaban muchos de los mismos quehaceres domésticos. Abundan los restos de preparación de comida y de otras actividades diarias, y los fogones cuadrados, delimitados con piedras, son también frecuentes, aunque menores. Pero el grueso de la población cocinaba en fogones con forma de trébol: tres piedras erguidas servían de soporte a recipientes de fondo redondeado. Hay otras diferencias sustanciales entre las casas de los ricos y las de los pobres; las habitaciones de éstos, más pequeñas, eran irregulares y estaban agrupadas; los muros poseían pocas hileras de piedra y el resto del lienzo de pared era de caña o madera, revestidas de barro.

Aunque nuestras excavaciones revelaron una sociedad de una complejidad insospechada para su época, la



4. ANTIGUOS FRISOS, visibles todavía en la parte inferior de los muros que flanqueaban la entrada principal del montículo de Huaca A.

continuación de las mismas nos hizo tomar conciencia de una entidad política integrada y de mucho mayor calado. En el brazo septentrional del valle de Casma se encuentra el Complejo de Sechín Alto: cuatro yacimientos que en conjunto abarcan 10,5 kilómetros cuadrados, más de cinco veces el área de Pampa de las Llamas-Moxeke. Hasta el año 1992 sólo se había excavado con rigor científico el menor de los cuatro núcleos, Cerro Sechín. Desde entonces hemos cosechado numerosas pruebas que relacionan todos los yacimientos del complejo entre sí y con Pampa de las Llamas-Moxeke.



5. PIEDRA TALLADA (procedente posiblemente de un altar) encontrada en el patio de Huaca A. Presenta grabadas sus caras frontal e inferior. En su origen, se apoyaba sobre dos piedras sin trabajar y a su alrededor habría ofrendas de alimentos.

Nuestras campañas de 1992 y de 1993 se centraron en el yacimiento mejor conservado del complejo de Sechín Alto, Taukachi-Konkan. Los habitantes de Taukachi-Konkan utilizaron los mismos tipos de cerámica y elementos arquitectónicos que habíamos visto cinco kilómetros más al sur. Los montículos principales contenían las mismas unidades de habitaciones cuadradas, alacenas y entradas restringidas que en los yacimientos de tamaño intermedio. El centro del asentamiento está abierto, formado por varias plazas rectangulares, amplias y unidas por alineaciones de montículos de tamaño medio. Dos grandes montículos se abren hacia unas plazas circulares hundidas, similares a la que se encuentra al lado de Huaca A. La datación por radiocarbono de seis muestras proporciona fechas que se escalonan desde el 2000 hasta el 1300 a.C.

Los yacimientos, aunque parecidos en algunos aspectos, presentan diferencias muy significativas, lo que nos ha inducido a advertir que la temprana sociedad del valle de Casma encerraba una complejidad mucho mayor de lo que habíamos imaginado. La principal elevación de Taukachi-Konkan, el Cerro de las Columnas, difiere de cualquier otro de los montículos excavados. Se sitúa en el extremo occidental del yacimiento y su parte más alta se divide en dos grandes patios centrales, a cuyo alrededor se disponen simétricamente numerosas unidades de habitaciones cuadradas. En la mitad frontal de dicha parte alta del cerro encontramos los restos de un centenar de columnas redondas hechas de haces de caña, cuerdas y piedras cubiertos de mortero y argamasa de barro. Estas columnas sostenían un techo, rasgo distintivo por único, que daría sombra a los miembros de la élite y les protegería de las miradas.

El Cerro de las Columnas debió de ser residencia de un personaje principal, el señor quizá del complejo de Sechín Alto o de todo el sistema del valle de Casma. Además del patio cubierto, había habitaciones techadas y tachonadas de hornacinas que se destinarían a guardar los productos de gran valor recibidos o regalados. En otras habitaciones, probables estancias de reuniones o audiencias, hay hornacinas someras, más apropiadas para sentarse. Las habitaciones situadas en la mitad posterior de la parte alta del montículo presentan una disposición irregular y son menos accesibles; serían los aposentos privados. En la misma zona hay dos estructuras redondas y sin respiraderos (para usos religiosos de relevancia menor).

La situación de este palacio en Taukachi-Konkan es lógica, si consideramos que el complejo de Sechín Alto constituyó seguramente la capital de una entidad política que abarcaba todo el valle. Pese a que ambos yacimientos son centros importantes, ahora sabemos que formaban parte vital de una sociedad aún más extensa y compleja que estaba muy desarrollada en el año 1800 a.C.

Tras perdurar durante la mayor parte del milenio, se abandonaron esas ciudades. Los muchos edificios que quedaron sin terminar en los dos asentamientos sugieren un final brusco, no un declive gradual. Al principio, se especuló con la posibilidad de que invasores procedentes de las culturas del altiplano hubieran declarado la guerra a los asentamientos costeros, destruyendo su civilización. Las pruebas de la desaparición del Período Inicial coinciden con la súbita aparición del maíz, la domesticación de los animales, nuevos tipos de instrumentos y estilos de edificación diferentes. Hemos descubierto recientemente, sin embargo, que los conflictos internos debilitaron la cultura del valle de Casma, favoreciendo la causa de los invasores.

Las esculturas de piedra de Cerro Sechín nos muestran, a tamaño natural, guerreros victoriosos y sus víctimas mutiladas: clara representación de una batalla. La pintura facial de los guerreros y los símbolos de sus mazas de guerra, compuestos por un rectángulo dentro de un círculo (como los del friso de Huaca A), apoyan la hipótesis de vencedores locales. Pero la vestimenta de las víctimas se parece mucho a la de las figuras humanoides que decoraban la fachada del templo del montículo de Moxeke.

Sólo podemos adivinar qué facciones combatieron entre sí. Cerro Sechín tal vez conmemore la victoria de una parte de la élite sobre otra; quizá los burócratas, asociados con las actividades más seculares de Huaca A, depusieron a la jerarquía religiosa de Moxeke en un conflicto decisivo entre iglesia y estado. O quizá las esculturas representen una rebelión popular contra la burocracia proliferante. Conforme crecían estas planificadas ciudades y aumentaba el número de señores, las exigencias sobre el pueblo pudieron volverse excesivas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ORIGINS AND DEVELOPMENT OF THE ANDEAN STATE. Dirigido por Jonathan Haas, Shelia Pozorski y Thomas Pozorski. Cambridge University Press, 1987.

CHAVIN AND THE ORIGINS OF ANDEAN CIVILIZATION. Richard L. Burger. Thames and Hudson, 1992.

EARLY CIVILIZATIONS IN THE CASMA VALLEY, PERU. Shelia Pozorski y Thomas Pozorski en *Antiquity*, vol. 66, n.º 253, páginas 845-870, diciembre de 1992.

Optica adaptativa

Unas técnicas desarrolladas durante la guerra fría con fines militares dotan de nuevas posibilidades a los telescopios terrestres

John W. Hardy

La turbulencia atmosférica, que hace que las estrellas titilen y los objetos lejanos centelleen, ha sido fuente de frustración para los astrónomos desde que se inventaron los telescopios. "El único Remedio es un Aire sumamente sereno y tranquilo", escribió Sir Isaac Newton en 1704, "como el que quizá haya en las cimas de las Montañas más altas, por encima de las Nubes corpóreas". Los astrónomos han seguido este consejo que Newton ofreció en su *Optica*, pero hasta en las cimas más altas la turbulencia atmosférica limita la potencia de los grandes telescopios. El *Telescopio Espacial Hubble* da fe de la altura a que están dispuestos a llegar los astrónomos para librarse de la turbulencia.

Investigadores de distintos centros han perseguido otra solución del problema de la turbulencia atmosférica, que no requiere abandonar la superficie terrestre. También nosotros en la compañía *Litton Itek Optical Systems*, en Lexington. Nuestro método, al que se da el nombre de óptica adaptativa, se basa en el desarrollo de la tecnología espacial, aunque, por ironía de las cosas, se aplica a los telescopios terrestres. La óptica adaptativa emplea un espejo deformable para compensar, o corregir, la distorsión que la turbulencia atmosférica causa en los frentes de onda. La técnica que sirve de soporte a dicha óptica mejorará la capacidad que los telescopios terrestres de la próxima generación tendrán de resolver fuentes puntuales y detectar en el cielo objetos de extrema debilidad.

La construcción de telescopios astronómicos topa con la dificultad de obtener la imagen más clara posible de una estrella lejana, que debería aparecer como un solo punto. Los objetos extensos, las galaxias, los planetas, pueden considerarse colecciones de puntos. Una estrella lejana produce un frente de onda esférico que viaja por el espacio hasta llegar a la atmósfera terrestre, donde la turbulencia lo distorsiona. Los cambios de temperatura asociados con la turbulencia producen variaciones en la densidad del aire, causa del retardo que sufren, en diverso grado, distintas partes del frente de onda y motivo de que la imagen se distorsione. Con la incorporación de un sistema de óptica adaptativa en los telescopios se pretende invertir dicho efecto y restaurar la forma esférica del frente de onda.

Se empieza por determinar el grado de desfase de cada componente del frente de onda con respecto a los otros. Para ello, se divide el espejo del telescopio en una serie de zonas y se mide la inclinación del frente de onda en cada una. Con la información resultante, una vez procesada mediante circuitos electrónicos de alta velocidad, se controlan los actuadores que determinan la posición de cada zona de la superficie del espejo. Así, se deforma el espejo de suerte tal que cualquier componente del frente de onda que llegue más tarde que otro recorra una distancia más corta hasta el punto focal. Este proceso de medida y ajuste —una realimentación clásica— se repite cientos de veces por segundo. Cuando la óptica adaptativa funciona correctamente, todos los componentes han de llegar al punto focal en fase, creando una imagen nítida.

Los ingenieros de radar se habían adelantado ya en la descomposición de un frente de onda en partes para luego devolverlas a la fase correcta. Los principios matemáticos necesarios para compensar la distorsión de un frente de onda son prácticamente los mismos para las imágenes ópticas que para el radar. Al principio de los años cincuenta, los ingenieros de radar empezaron a dividir las antenas en segmentos, al objeto de ajustar de forma independiente la fase de la señal proveniente de cada zona. Por medio del desplazamiento de fase de los componentes de la onda lograron seguir objetos en movimiento con una antena fija o enfocar el haz sobre objetos situados a diferentes distancias.

La idea de aplicar principios adaptativos a los sistemas ópticos surgió en 1953, de la mano de Horace W. Babcock; propuso que se controlase el grosor de una capa de líquido depositada sobre un espejo rígido mediante un haz de electrones con el fin de compensar los errores de fase del frente de onda incidente. Los componentes del frente de onda cuyas fases precediesen a las demás se retrasarían haciéndolos pasar por una lámina de líquido más gruesa.

En 1956 se aplicó la idea, más simple, de estabilizar el movimiento de la imagen con una placa lisa de inclinación variable en uno de los espectrógrafos del telescopio Hale de 5 metros. Robert B. Leighton describió el uso de un espejo de cabeceo y pistón (*tip-tilt*), un espejo de inclinación ajustable, para obtener óptimas fotografías de los planetas.

Sin embargo, la corrección total de la turbulencia atmosférica siguió siendo un objetivo inalcanzable hasta los años setenta, por un doble interés de la defensa estadounidense. Primero, los científicos del Pentágono que se dedicaban a los misiles antibalísticos necesitaban encontrar la manera de enfocar un láser sobre un objetivo

JOHN W. HARDY lleva más de veinte años dedicado al desarrollo de la óptica adaptativa. Se formó en la Universidad de Londres, donde en 1946 se licenció en ingeniería electrónica.

1. TELESCOPIO equipado con óptica adaptativa, del que es responsable Robert Q. Fugate, del laboratorio Phillips. Los sistemas de óptica adaptativa mejoran las imágenes recogidas por los telescopios terrestres al borrar los efectos difuminadores de la atmósfera.

remoto, al tiempo que se protegía el haz de la degradación atmosférica. En segundo lugar, la Unión Soviética estaba lanzando un gran número de satélites militares. La Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación para la Defensa (la actual ARPA) buscaba mejores métodos para identificarlos. Las fotografías tomadas con telescopios de seguimiento de satélites emplazados en tierra resultaban, a causa de la atmósfera, demasiado borrosas como para proporcionar imágenes de utilidad aun aplicando un procedimiento de mejora digital.

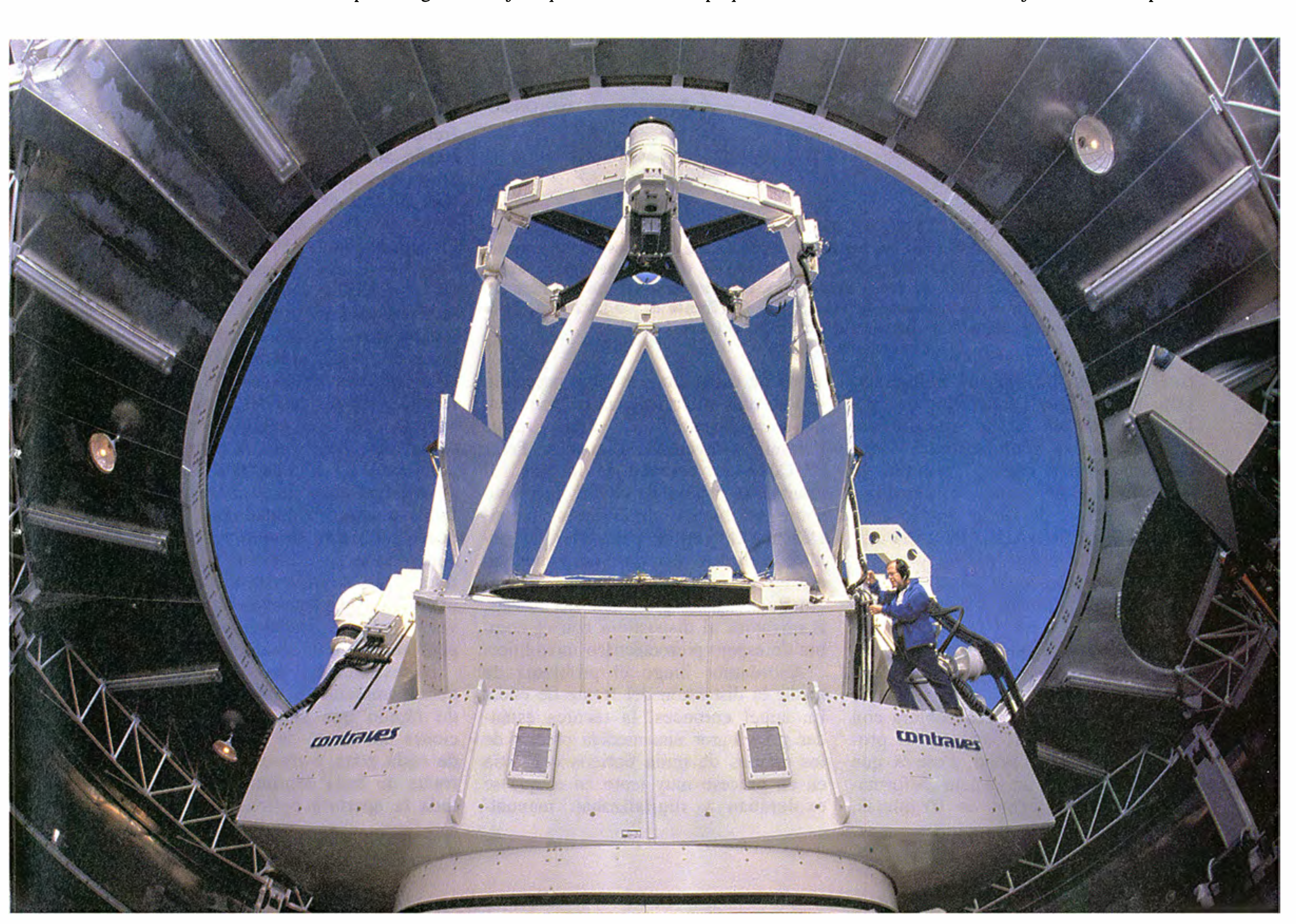
En 1972 trabajaba yo en *Litton Itek Optical Systems*, empresa que ganó un contrato con la ARPA para desarrollar un método más efectivo. Recurrimos a la óptica adaptativa para que la distorsión "volviese sobre sus pasos" antes de que se registrase la imagen; se trataba de construir un sistema de compensación atmosférica en tiempo real (CATR).

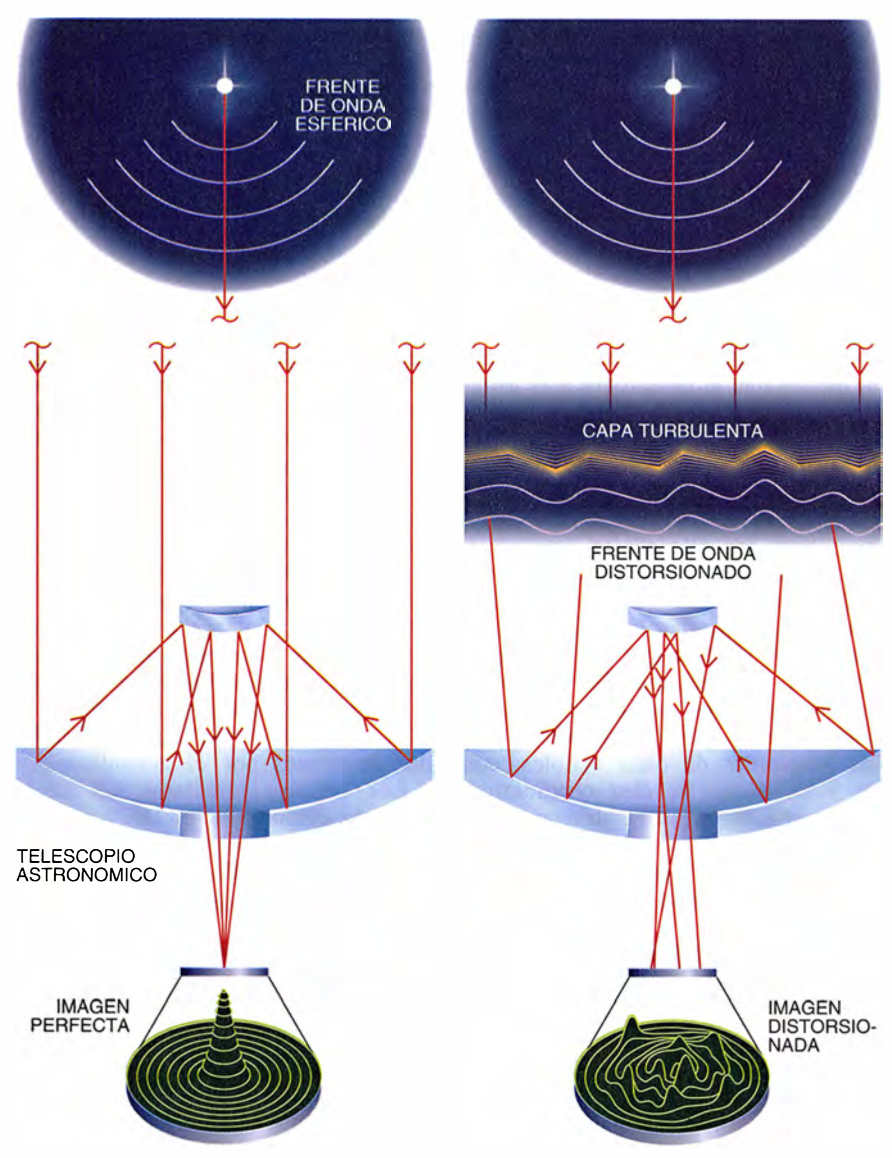
Aunque este principio ya había sido probado en aplicaciones de radar, no se habían construido todavía los componentes de un sistema óptico adaptativo. Para crear un sistema tal, hubo que enfrentarse a un problema clave: ¿con qué finura hay que dividir el frente de onda incidente para lograr una reconstrucción satisfactoria de la imagen original? La respuesta determina cuántos actuadores, controlados de forma independiente, necesita el espejo deformable, lo que a su vez determina el costo y la complejidad del sistema. Afortunadamente, en 1966, David L. Fried había ofrecido una pista para hallar la respuesta. Fried vio que los efectos ópticos de la turbulencia del aire se pueden describir mediante formas —aberraciones— simples del frente de onda, tales como la inclinación, el desenfoque y el astigmatismo (curvatura esférica y cilíndrica), harto conocidas para los que trabajan en óptica. Además, la intensidad de la turbulencia se puede representar con una sola magnitud —r_0— que, para los telescopios corrientes, es el diámetro de la mayor apertura utilizable antes de que la turbulencia empiece a degradar la calidad de la imagen. A medida que la turbulencia aumenta, r_0 disminuye. En los observatorios terrestres, este parámetro varía entre cinco y quince centímetros para las longitudes de onda visibles, con un valor medio de diez centímetros.

Por esa razón, los telescopios de gran tamaño no resuelven nunca objetos del estilo de las estrellas dobles mejor que lo haría un pequeño instrumento de aficionado. (Los telescopios grandes recogen una cantidad suficiente de luz que permita detectar objetos muy débiles. También hay períodos en los que la turbulencia es pequeña, lo que posibilita que estos instrumentos alcancen una buena resolución.)

En óptica adaptativa, r_0 define el tamaño de cada una de las zonas que hay que ajustar a fin de restaurar la imagen. Para lograr una buena compensación a longitudes de onda visibles, un telescopio de 4 metros necesita un espejo deformable controlado por unos 500 actuadores. El valor de r_0 depende también de la longitud de onda de la luz incidente. En la banda infrarroja, a dos micras, el valor medio de r_0 es de unos 50 centímetros, de modo que el número de actuadores que requiere un telescopio de 4 metros desciende a 50, más o menos. Nos proponíamos construir un prototipo equipado con un número de actuadores suficiente para poner a prueba la idea. De una forma algo arbitraria, nos decidimos por 21 actuadores.

Los únicos correctores de frente de onda disponibles en 1972 consistían en espejos segmentados y diseñados para remediar la distorsión de los láseres infrarrojos. Estos disposi-





2. EL ASPECTO DE LAS ESTRELLAS depende, cuando se las observa desde una gran distancia, de la integridad de los frentes de onda de luz esféricos que producen. Si se pueden enfocar todos los componentes del frente de onda, la estrella aparece en forma de un punto de luz perfecto (*izquierda*). Sin embargo, la turbulencia atmosférica distorsiona aleatoriamente la morfología del frente de onda, lo que hace que los componentes lleguen desfasados al punto focal (*derecha*).

tivos pecaban de lentitud e imprecisión. Al principio parecía que un cristal de óxido de silicio bismuto era una alternativa prometedora. Vimos que era posible ajustar, mediante la aplicación de un voltaje, el desplazamiento de fase de la luz que lo atravesaba. Pero el cristal transmitía una cantidad insuficiente de luz y su capacidad de corrección de la fase era muy pobre para los efectos de la turbulencia.

Exploramos la posibilidad de utilizar un espejo flexible construido con una placa aluminizada, muy fina, que reflejara bien la luz y se doblara con facilidad, pero costó superar el problema de la estabilidad. Pese a que la superficie de un espejo deformable se desplaza menos de 10 micras, se ha de controlar con gran precisión —con una tolerancia muy pequeña, de un cincuentavo de micra. Julius Feinleib, Steven G. Lipson y Peter F. Cone se percataron de que, al montar un espejo de cristal muy fino sobre un bloque de material piezoeléctrico dotado de electrodos, se podían controlar las deformaciones en cientos de zonas del espejo a la velocidad y con la precisión necesarias. Bautizamos al dispositivo con el nombre de espejo piezoeléctrico monolítico.

Abordamos luego el problema de medir la distorsión del frente de onda. En aquel entonces, la técnica estándar para lograr una medida precisa de los frentes de onda ópticos consistía en un proceso muy lento en el que se exploraban y digitalizaban manualmente las fotografías procedentes de un interferómetro láser. Con un poco de suerte, la información sobre el frente de onda estaba disponible al día siguiente, algo tarde para la respuesta en una milésima de segundo que la lógica adaptativa necesitaba.

Para nuestra fortuna, se estaba desarrollando un nuevo método de medir frentes de onda, la interferometría de desplazamiento de fase (*shearing interferometry*). Los interferómetros se usan en óptica para medir la fase de un frente de onda superponiéndolo con un segundo frente cuyas características se conocen, con lo que se produce un patrón interferencial. En óptica adaptativa se necesita saber tan sólo la fase relativa de cada una de las zonas de la apertura con respecto a sus vecinas para determinar hasta qué punto la turbulencia atmosférica ha distorsionado la forma del frente de onda. Los interferómetros de desplazamiento de fase realizan esta tarea al desplazar, o "cizallar" (*shearing*), dos copias del mismo frente de onda una distancia conocida y superponerlas a continuación. La intensidad del patrón de interferencia resultante es proporcional al gradiente, o pendiente, del frente de onda.

Sin embargo, aquellos interferómetros de desplazamiento de fase sólo trabajaban con luz monocromática y producían un patrón de interferencia fijo. Para la óptica adaptativa necesitábamos tomar medidas rápidas del frente de onda usando luz blanca de banda ancha, procedente de satélites artificiales iluminados por el sol. James Wyant construyó un interferómetro de desplazamiento para la luz blanca mediante una red de difracción móvil que producía un patrón de interferencia con una variación de la intensidad sinusoidal. Una red de fotodetectores recogía la señal. Al comparar el desplazamiento de fase de la señal eléctrica resultante con una referencia prefijada, resultaba exactamente proporcional a la pendiente del frente de onda óptico en la zona correspondiente de la apertura. Este tipo de interferómetro de desplazamiento es fiable y estable ópticamente; requiere poco calibrado. Mejoras posteriores aumentaron la velocidad del dispositivo; llegó a medir 10.000 frentes de onda ópticos completos por segundo, velocidad que bastaba para medir la peor turbulencia atmosférica.

Necesitábamos un elemento más para completar el sistema: un método rápido que sintetizase las mediciones del frente de onda procedentes de cada zona y trazase un mapa del frente de onda continuo que abarcara toda la apertura óptica. Este proceso

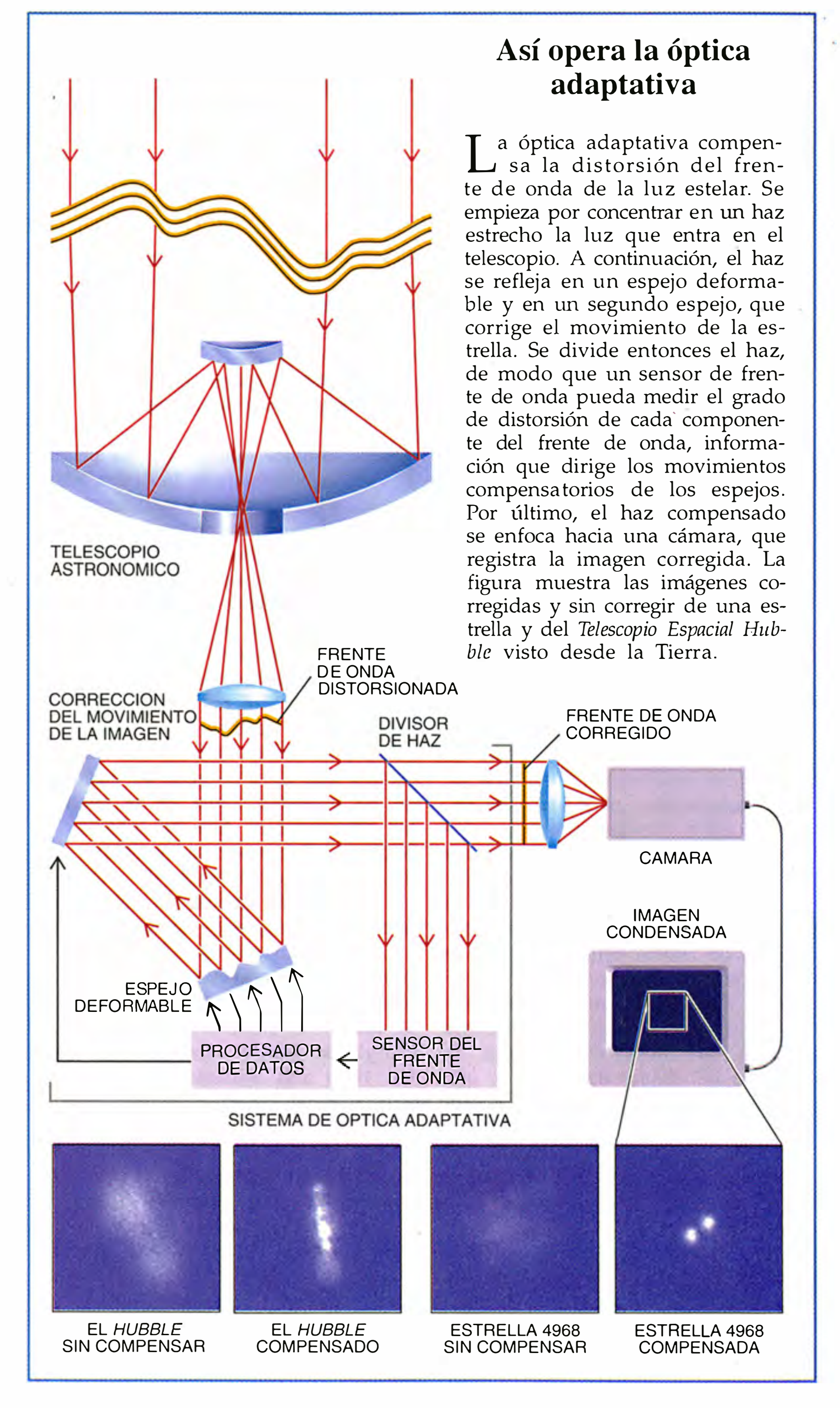
de reconstrucción del frente de onda es indispensable para determinar el ajuste de cada actuador individual. Debido al reducido tamaño de los ordenadores digitales de esa época, el cálculo en serie presentaba problemas. Volvimos a la tecnología analógica. Construimos una red eléctrica sencilla dispuesta de la misma forma que los actuadores detrás del espejo deformable. Se aplicaron a los nodos de la red corrientes eléctricas que representaban los valores del frente de onda medido, lo que produjo los voltajes exactos necesarios para ajustar los actuadores. Esta red en paralelo, velocísima, podíamos expandirla para manejar un gran número de actuadores sin merma de velocidad.

A medida que se acercaba la fecha para probar nuestro compensador atmosférico en tiempo real, en diciembre de 1973, crecía nuestra preocupación por la estabilidad del instrumento mientras operase. Cada uno de los 21 actuadores estaba provisto de su bucle de realimentación, pero se producía un acoplamiento cruzado entre los bucles a través del espejo deformable. En otras palabras, la corrección del frente de onda en una zona ejercía un ligero efecto en las demás. Nuestros cálculos demostraban que el nuevo sistema debía ser estable, pero siempre existía la posibilidad de que surgiera un problema imprevisto. Nos preocupaba que el CATR empezara a oscilar, porque ello podría arruinar el espejo piezoeléctrico monolítico que habíamos diseñado. Durante las primera pruebas, comprobamos que el sistema, más estable que una roca, funcionaba a la perfección.

El CATR demostró que la óptica adaptativa podía compensar imágenes extensas degradadas por la turbulencia. Pero los actuadores con los que contaba eran insuficientes para aplicarlos a un telescopio de grandes dimensiones. En 1976 comenzamos a construir una máquina mucho mayor, el sistema de imagen compensada (SIC), provisto de 168 actuadores. J. Kent Bowker, Richard A. Hutchin y Edward P. Wallner desempeñaron papeles importantes en el diseño de este sistema pionero. En 1980 lo instalamos en el telescopio de 1,6 metros del monte Haleakala, en Maui. Cuando en la primavera de 1982 lo probamos con estrellas brillantes, el SIC mostró una estabilidad perfecta.

El SIC nos aportó la primera prueba verdadera de hasta qué punto la óptica adaptativa mejora las prestaciones de los telescopios terrestres. Los resultados fueron admirables, especialmente para las estrellas dobles. La estrella más brillante del par, con la que el sensor del frente de onda mide la turbulencia, podía observarse antes de la corrección, pero su compañera no era más que un confuso y oscuro borrón. Ambas estrellas se movían trémulamente a lo largo de varios segundos de arco. Al accionar el bucle de realimentación, se enfocaron con nitidez y permanecieron inmóviles en el monitor. El aumento del brillo de las imágenes era aún más impresionante que la mejora de nitidez.

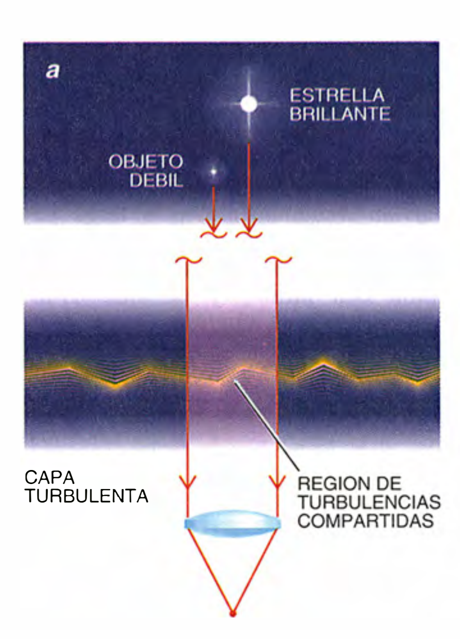
A partir de estos primeros esfuerzos se han construido nuevos tipos de espejos deformables con más de 1000 actuadores. Algunos son espejos segmentados; constan de numerosas placas lisas, cada una montada sobre tres actuadores piezoeléctricos de capa múltiple. Los espejos segmentados son los que mayor capaci-

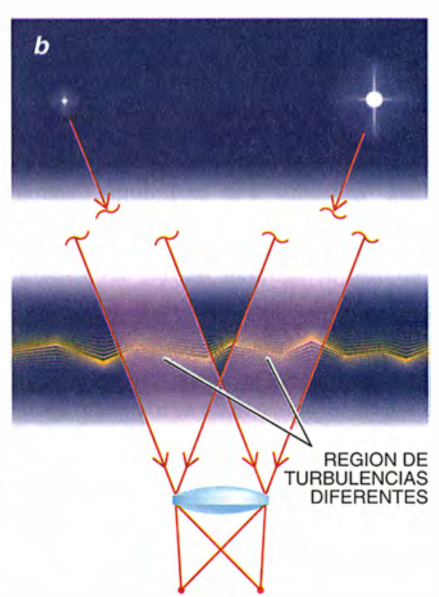


Así opera la óptica adaptativa

La óptica adaptativa compensa la distorsión del frente de onda de la luz estelar. Se empieza por concentrar en un haz estrecho la luz que entra en el telescopio. A continuación, el haz se refleja en un espejo deformable y en un segundo espejo, que corrige el movimiento de la estrella. Se divide entonces el haz, de modo que un sensor de frente de onda pueda medir el grado de distorsión de cada componente del frente de onda, información que dirige los movimientos compensatorios de los espejos. Por último, el haz compensado se enfoca hacia una cámara, que registra la imagen corregida. La figura muestra las imágenes corregidas y sin corregir de una estrella y del *Telescopio Espacial Hubble* visto desde la Tierra.

3. PARA OBSERVAR objetos débiles, se ha de medir la turbulencia atmosférica con estrellas más brillantes (*a*). Esta técnica sólo funciona si la estrella brillante se halla en la misma zona del cielo que el objeto que se observa; si están demasiado separados, la luz que emiten experimenta diferentes grados de turbulencia (*b*). Hay pocas estrellas cuyo brillo pueda servir de referencia, razón por la cual la técnica sólo resulta eficaz en una pequeña franja del cielo. Puede crearse un láser, dirigido a través de la atmósfera, a modo de estrella de referencia artificial (*c*). Con un tramado de balizas de láser se consigue iluminar un campo de visión entero (*d*). Con todo, seguimos precisando una estrella que caiga cerca para apuntar el telescopio.





dad tienen de compensar una turbulencia fuerte. Los segmentos están separados entre sí y proporcionan libertad de movimientos. Pero cada faceta requiere una calibración frecuente. Debido a la discontinuidad entre un segmento y el siguiente, los espejos de este tipo tienden a difractar parte de la luz, lo que afecta a la claridad de la imagen. Por ello los astrónomos prefieren espejos continuos de placa frontal. Estos espejos constan de una lámina frontal de vidrio aluminizado y flexible montada sobre actuadores fabricados con capas múltiples de material piezoeléctrico o electrorresistivo, que se expanden o contraen en respuesta a un voltaje de control. Los actuadores están montados sobre una placa base rígida. Un espejo de placa frontal continua tiende a una mejor estabilidad dimensional, requiere menos mantenimiento y proporciona una corrección más homogénea por toda la apertura del telescopio. Otro tipo de espejo deformable, en proceso de desarrollo, es el espejo bimorfo, constituido por elementos piezoeléctricos planos adheridos a la parte posterior de una lámina frontal delgada que se dobla al recibir un voltaje. La Universidad de Hawai está construyendo un sistema de óptica adaptativa basado en un espejo bimorfo. Este sistema se vale de un sensor de frente de onda que mide directamente la curvatura del frente de onda, lo que simplifica los cálculos requeridos para controlar los actuadores.

Para las longitudes de onda del infrarrojo, donde los efectos de la turbulencia atmosférica son menos intensos, los "correctores modales" ofrecen una posibilidad elegante de compensar la distorsión del frente de onda. Estos dispositivos corrigen la inclinación, el desenfoque, el astigmatismo y otras aberraciones.

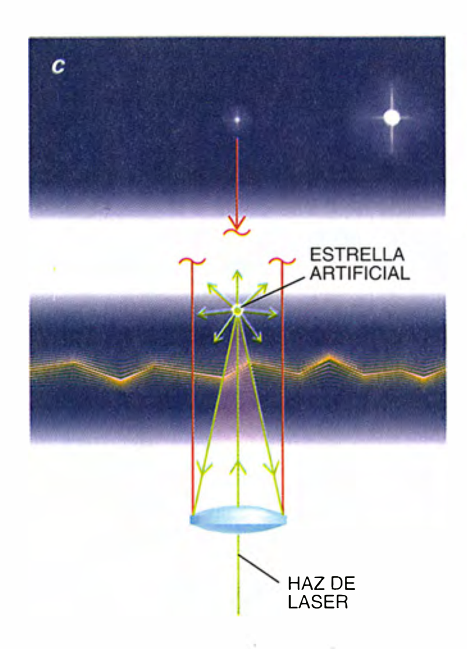
Se trabaja en la aplicación de redes neuronales a la interpretación de las señales procedentes del sensor óptico y al control del espejo deformable. Algunos creen que se puede enseñar a una red neuronal a que interprete estos registros mejor que las actuales redes basadas en algoritmos.

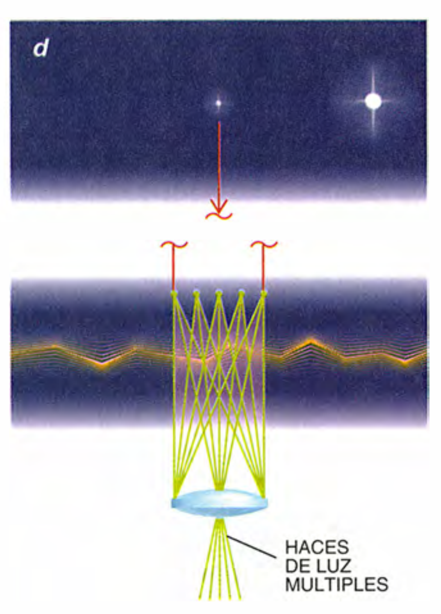
Pese al éxito notable de las primeras aplicaciones de la óptica adaptativa, su adopción generalizada en el campo de la astronomía observacional se ve obstaculizada por dos problemas fundamentales. Primero, los objetos débiles pueden observarse sólo cuando una estrella brillante se encuentra cerca de ellos. La necesidad de realizar medidas en tiempo real de la turbulencia tan rápidamente, al menos, como cambie la atmósfera determina el brillo que ha de tener la estrella que sirva de guía: en cada una de las pequeñas zonas de la apertura del telescopio se han de recoger los fotones suficientes para tomar una medición precisa del frente de onda. En un sistema de óptica adaptativa que trabaje con longitudes de onda visibles y bajo condiciones estándar, cada centésima de segundo hay que detectar al menos 100 fotones por cada zona de 10 cm^2. Para cumplir este requisito, la estrella de guiado debe ser de magnitud 10 o más brillante. En promedio, hay sólo tres estrellas de esta magnitud por cada grado cuadrado de cielo.

Esta restricción sería aceptable, de no darse un segundo problema fundamental: la compensación adaptativa sólo es efectiva cuando abarca un ángulo diminuto del cielo —ángulo isoplanático—, que para las longitudes de onda visibles no alcanza los cinco segundos de arco de ancho. Sobre un área mayor, la turbulencia varía demasiado con respecto a la que mide el sensor del frente de onda para obtener una imagen uniformemente clara; sólo se compensará, pues, la parte central de la imagen, y ésta aparecerá cada vez más borrosa cerca de los contornos. Al no poderse compensar más que una minúscula zona del cielo alrededor de cada estrella de guiado, la óptica adaptativa, sirviéndose de estrellas de guiado naturales, no puede acceder a una gran parte del cielo.

Se estudian dos maneras de burlar estos obstáculos. La primera es emplear longitudes de onda más largas (infrarrojas), donde los efectos ópticos de la turbulencia son mucho menos graves y, dado que el valor de r_0 a esas longitudes de onda es entre 5 y 12 veces mayor que en las longitudes de onda visibles, cada zona de corrección puede aumentarse en la medida correspondiente. En una zona mayor las perturbaciones del frente de onda tardan más en variar; se tiene, pues, más tiempo para recoger la luz y, en consecuencia, se pueden utilizar estrellas más débiles de guías. Además, el ángulo isoplanático es mayor a longitudes de onda más largas y, por tanto, la zona sobre la que es efectiva la compensación adaptativa también aumenta. Estos factores, tomados en conjunto, permiten utilizar una estrella de guiado visible para otorgar mayor nitidez a las observaciones infrarrojas sobre una fracción del cielo mucho mayor de lo que sería factible con longitudes de onda visibles.

El primer sistema infrarrojo, el *Come-On*, fue desarrollado a principios de los años ochenta por el Observatorio Europeo del Sur (ESO) e investigadores franceses. Se ha ensayado con éxito en el telescopio de 3,6 metros del observatorio de La Silla, Chile.





La segunda forma de abordar el problema consiste en utilizar haces de láser para producir balizas, o estrellas de guiado, artificiales. Investigadores del laboratorio Lincoln del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y del laboratorio Phillips de las Fuerzas Aéreas de EE.UU. encontraron un método mucho más potente para medir la turbulencia atmosférica. En los años ochenta estudiaban cómo disparar un arma láser de modo que descargara la mayor cantidad de energía posible sobre un objetivo situado más allá de la atmósfera. Los láseres experimentan en las longitudes de onda visibles el mismo tipo de distorsión que sufre la luz procedente de una estrella lejana; se les puede, pues, aplicar los principios de la óptica adaptativa. En 1982 los del MIT corrigieron la distorsión de un láser emitido hacia el espacio con una versión del SIC que tenía 69 actuadores —el "experimento de compensación atmosférica (ECA)". Uno de los experimentos realizados en el transbordador espacial Discovery consistió en que éste llevara un retrorreflector que reflejaba un haz de láser de vuelta a la Tierra, donde se medía con él la distorsión atmosférica. En pruebas posteriores, los retrorreflectores, instalados a bordo de cohetes, fueron elevados a alturas de 600 kilómetros. Al introducir su información en un espejo deformable, se logró "predistorsionar" un segundo láser de manera que atravesara la atmósfera y se enfocara en un pequeño objetivo situado en el cohete. Desde entonces, los instrumentos de óptica adaptativa del ECA se han utilizado con éxito en tareas astronómicas.

Los láseres crean en la estratosfera estrellas artificiales de guiado para los telescopios astronómicos. Y lo hacen de dos formas: produciendo la retrodispersión de moléculas de aire a altitudes de 10 a 40 kilómetros —una dispersión de Rayleigh— o estimulando la fluorescencia de una capa natural de vapor de sodio que está a unos 90 kilómetros de altura. Como la baliza de láser está mucho más cerca del telescopio que una estrella real, el dispositivo genera un haz cónico que atraviesa sólo parte de la capa atmosférica turbulenta antes de llegar a la apertura del telescopio. Este efecto se acentúa más con las balizas Rayleigh de baja altitud y obliga a usar más de una baliza de láser.

En 1983, Robert Q. Fugate demostró que con estrellas de guiado láser podían realizarse medidas del frente de onda. En él se creó el primer sistema completo de óptica adaptativa que se valía de estrellas de guiado láser, el SWAT (las siglas en inglés de "técnicas adaptativas de longitudes de onda cortas"). Entre 1988 y 1990, en el observatorio óptico del monte Haleakalai, se generaron con rayos láser de color pulsantes —su longitud de onda era de 0,512 micras— balizas artificiales a altitudes de entre 4 y 8 km. Se demostró que se había compensado la turbulencia mediante la comparación de imágenes de estrellas naturales tomadas con y sin la corrección adaptativa; el experimento enseñó que se obtenían mejores resultados con dos balizas de láser que con una.

Cuando se recurre a las balizas de láser se suele emplear un tipo diferente de sensor del frente de onda —el sensor Shack-Hartmann— porque puede trabajar con fuentes de luz continuas y pulsantes. El primero en utilizarlo fue Roland V. Shack, en 1971. Un tramado de lentes cubre el haz óptico; cada una de ellas produce una imagen de la estrella de guiado. Los gradientes del frente de onda se determinan al medir el desplazamiento de la imagen en cada zona.

En principio, las balizas de láser deberían permitir que se aplicase la compensación adaptativa a cualquier objeto celeste, por débil que sea y para cualquier longitud de onda capaz de atravesar la atmósfera. Sin embargo, la necesidad de disponer de una estrella natural para apuntar el telescopio limita la eficacia de las balizas. Pero éstas no sirven para apuntar, pues no están fijas en el cielo; su posición absoluta varía en consonancia con el efecto de la turbulencia sobre el haz láser. Dada la necesidad de disponer de una estrella de apuntado, la óptica adaptativa sólo puede abarcar, a longitudes de onda visibles, un 30 por ciento del cielo. A longitudes de onda infrarrojas, la cobertura del cielo llega al 100 por cien.

Uno de los problemas pendientes es el de la creación de imágenes nítidas a lo largo de grandes campos de visión. No se ha podido aún obtener una imagen compensada del disco de Júpiter; el disco mide unos 40 segundos de arco de ancho y engloba unos 50 parches isoplanáticos diferentes, o zonas donde la turbulencia atmosférica difiere bastante. Se discute el empleo de espejos deformables múltiples en conjunción con una serie de estrellas de guiado láser. Cada espejo actuaría, al compensar la turbulencia a lo largo de un intervalo de altitudes en la atmósfera, como un corrector tridimensional. Con las estrellas de guiado podrían realizarse muchas medidas del frente de onda, que abarcarían un amplio campo de visión.

Tras 25 años de desarrollo, la óptica adaptativa va expandiendo su dominio de aplicación, fundamentalmente en la astronomía terrestre. El diseño de la mayoría de los grandes telescopios que se están planeando o construyendo en estos momentos incluye la óptica adaptativa.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ADAPTIVE OPTICS: REVISITED. Horace W. Babcock, en *Science*, vol. 249, páginas 253-257; 20 de julio, 1990.

PRINCIPLES OF ADAPTIVE OPTICS. Robert K. Tyson. Academic Press, 1991.

ADAPTIVE OPTICS FOR ASTRONOMY: PRINCIPLES, PERFORMANCE AND APPLICATIONS. J. M. Beckers, en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 31, páginas 13-62; 1993.

El lenguaje de la danza de las abejas melíferas

Experimentos recientes, en los que se entrena a las abejas para que respondan a los sonidos y se las recluta utilizando un robot, han puesto punto final a los debates en torno al lenguaje de la danza

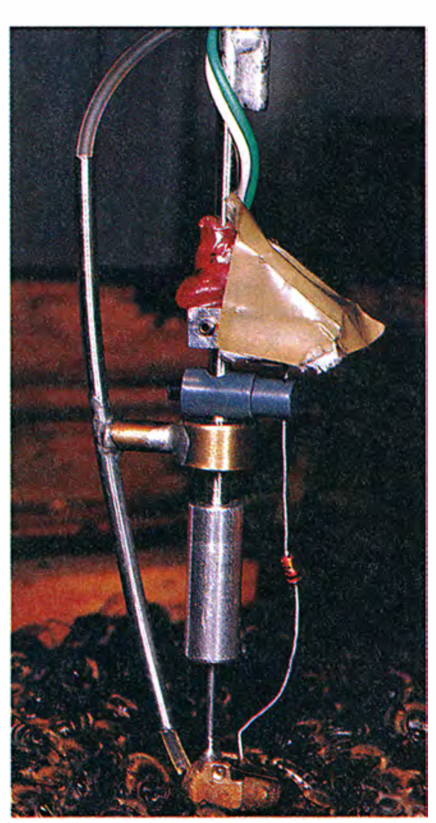
Wolfgang H. Kirchner y William F. Towne

Desde hace ya varios siglos, los naturalistas habían observado que las abejas melíferas informan a sus compañeras de nido sobre los descubrimientos que realizan a extramuros de la colmena. Sin embargo, el sistema de comunicación empleado por los insectos constituyó un misterio hasta los años cuarenta, cuando Karl von Frisch, de la Universidad de Munich, desentrañó el significado de las danzas de las abejas. En la colmena, los pasos y contoneos de una abeja que ha tenido éxito en su búsqueda de alimento guardan estricta correlación con la dirección y distancia exactas desde el nido hasta el recurso hallado. Durante las dos décadas siguientes, la mayoría de los científicos creyó que las abejas se basaban en tales movimientos silenciosos para comunicarse.

Pero en los años sesenta esa tesis se puso en tela de juicio, desde dos flancos. Los primeros que la cuestionaron fueron Adrian M. Wenner, alumno entonces de doctorado en la Universidad de Michigan y hoy adscrito al claustro docente de la de California en Santa Bárbara, y Harald E. Esch, en esa fecha en la Universidad de Munich y ahora en la de Notre Dame. Trabajando de forma independiente, llegaron a un mismo descubrimiento: las danzas no eran silenciosas. Al bailar, las abejas emiten débiles sonidos de baja frecuencia. Lo mismo Wenner que Esch sugirieron que los sonidos podían desempeñar un papel fundamental en la comunicación de las abejas. En el uso de sonidos, razonaban, se escondería la explicación de su capacidad para comunicarse de forma eficaz dentro de la oscuridad absoluta que reina en el interior de sus colmenas. Acontecía, sin embargo, que muchos creían que las abejas eran sordas. Y, así, la cuestión permaneció abierta.

Más tarde, Wenner volvía a desafiar la explicación dada por von Frisch sobre el lenguaje de la danza, al tiempo que revisaba su primera hipótesis. Las abejas, afirmaba, no sacan especial información de la danza ni de los sonidos; antes bien, los insectos se basan en los olores para encontrar la nueva fuente de alimento reconocida por la danzante.

Ambos puntos de debate acaban de hallar resolución. Resulta que las





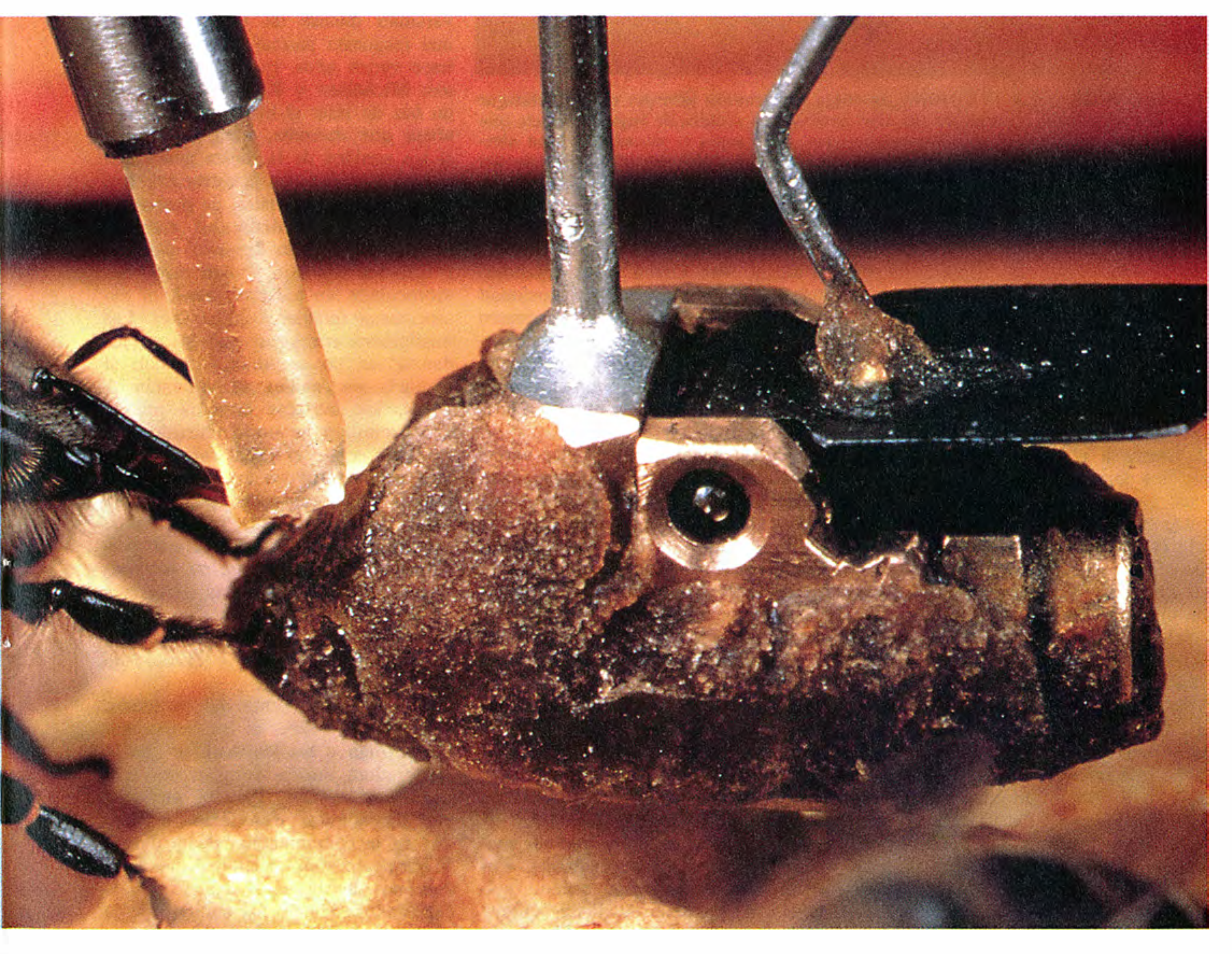
1. ROBOT de abeja melífera. Dirigido por una serie de motores de fases, puede bailar y emitir sonidos similares a los producidos por una abeja exploradora (*arriba*). Los experimentos con este robot nos han permitido descubrir el modo en que los sonidos están implicados en el lenguaje de la danza. Una jeringa suministra agua azucarada a sus seguidoras, en perfecta imitación de lo que realiza una abeja exploradora cuando ofrece muestras de alimento a sus compañeras (*derecha*).

abejas oyen. Poseen oídos cabalmente adaptados para detectar los sonidos asociados con las danzantes. Gracias a un robot que danza y canta como una abeja encargada de buscar alimento, y a las respuestas consiguientes desencadenadas por los insectos, se ha podido corroborar que uno y otra, el sonido y la danza, son necesarios para transmitir la información sobre el foco de alimento. El experimento demuestra que las danzas silenciosas no comunican nada y que el sonido sin la danza también fracasa. Los olores, cuya implicación se reconoce, carecen, empero, de la importancia que Wenner les concede. Más allá de la resolución de esos puntos, conocemos ahora mucho mejor la naturaleza de los sonidos de la danza, el sentido del oído de las abejas y los aspectos del baile que intervienen de una forma destacada en la comunicación.

WOLFGANG H. KIRCHNER y WILLIAM F. TOWNE iniciaron su colaboración en 1987 y descubrieron conjuntamente el sentido del oído de la abeja melífera. Kirchner, graduado en 1987 por la Universidad de Würzburg, donde hoy ejerce como profesor, ha dedicado los últimos diez años al estudio de los mecanismos y la evolución de la comunicación a través de la danza en las abejas melíferas. Towne viene trabajando en la misma cuestión desde 1980. Se doctoró en biología por la Universidad de Princeton en 1985 y hoy enseña biología en la Universidad de Kutztown, en Pennsylvania.

Produce una innegable satisfacción el haber descifrado un enigma tan antiguo. El viejo Aristóteles advirtió ya la capacidad de la abeja melífera para reclutar a sus compañeras de panal y hacerlas acudir hasta una fuente de alimento apetitosa, pero no se preguntó por el proceso de comunicación. Vio, como otros muchos naturalistas, que una abeja que encuentra un nuevo foco de manjar torna al nido y danza para sus hermanas, en vez de disfrutar ella sola. Se cuenta que Plinio construyó una colmena que tenía una ventana de cuerno transparente, a través de la cual podía inspeccionar el baile.

Ya en nuestro siglo, estudiando abejas mantenidas en una colmena de paredes de cristal, von Frisch y sus seguidores reconocieron un patrón de danza: la abeja recolectora camina a través de las láminas verticales de un panal que cuelga de la colmena y dibuja un ocho; tras cada lazada, realiza una pausa y sacude su cuerpo de un lado a otro. El baile atrae la atención de reclutas potenciales, que observan fijamente a la danzarina durante cierto tiempo y salen presto volando por su cuenta hacia el objetivo. Si lo que encuentran les gusta, los reclutas retornan al nido y se ponen a danzar, partiendo así más abejas de la colmena hacia la fuente alimentaria descubierta. Ocurre que





2. DE VUELTA A LA COLMENA, la abeja exploradora informa de sus hallazgos mediante la danza y el batir de sus alas; produce así sonidos de baja frecuencia que son transmitidos por el aire. Sus compañeras de colmena se amontonan a su alrededor y escuchan los sonidos gracias a ciertos órganos del segundo artejo de sus antenas. Observan atentamente la danza durante un corto tiempo y después salen volando para buscar por su cuenta el foco de alimento.

los recursos mejores inspiran mayor número de bailes y, con ello, un número mayor de abejas.

En los años veinte, von Frisch lanzó la idea de que la danza de la recolectora ofrecía a las abejas residentes algún tipo de información sobre la fuente de alimento. Pero hasta 1943 no descubrió que la dirección hacia la cual se encaraba la danzarina durante su circuito de contoneo apuntaba hacia el lugar de aprovisionamiento de acuerdo con su situación en relación al Sol. Si, en su contoneo, la abeja se encaraba directamente hacia arriba, hacia las 12 del reloj, se llegaba al alimento siguiendo la dirección del Sol; si se contoneaba 60 grados a la izquierda de las 12, encarándose a las 10 de un cuadrante de reloj, entonces el alimento se encontraba 60 grados a la izquierda del Sol.

Von Frisch percibió también que la rapidez con que la danzarina completaba sus circuitos correspondía a la distancia entre la colmena y el lugar de alimentación: cuanto más cercano éste, más frenético era el ritmo de la danza. Von Frisch y sus colaboradores describieron con minuciosiodad el lenguaje de la danza. Cronómetro en mano, observaban la danza, desentrañaban su significado y localizaban después el foco de suministro indicado. Las traducciones exactas constituyeron todo un éxito.

Pero quedaban por despejar varias incógnitas sustantivas. Para empezar, ellos no podían probar que la danza fuera un auténtico lenguaje. Cabía la posibilidad de que la supuesta correlación entre los frenéticos movimientos de la exploradora y sus hallazgos en el campo se debiera a meras coincidencias, correlación carente, por tanto, de significado real para las propias abejas.

Además, los naturalistas tenían que resolver la cuestión previa sobre la percepción e interpretación de la danza por parte de las residentes. Los etólogos sí veían, con toda nitidez, a la danzarina a través de la pared de cristal y podían cronometrar sus movimientos, pero los destinatarios, normalmente encerrados en oscuras colmenas, no gozaban de dicha ventaja. ¿Cómo eran las danzas a la vista de las abejas?

Años después de que von Frisch interpretara el simbolismo de las danzas, Wenner y Esch encontraron, cada uno por su cuenta, que las abejas danzarinas emiten sonidos durante su recorrido contoneante. Ambos sugirieron que la danzarina podría servirse de los sonidos para atraer la atención de los que se hallaban a oscuras en la colmena.

Muchos se mostraron escépticos ante esa explicación, pues seguían pensando que las abejas no podían oír sonidos transmitidos por el aire. Pero el asunto no se enterró. Muchos insectos, abejas incluidas, son muy sensibles a las vibraciones. Y algunos pensaron si los sonidos producidos por las exploradoras no harían vibrar los panales bajo sus patas mientras bailaban. Las vibraciones del panal advertirían quizás entonces de la danza a las abejas que, por lo demás, no podían ver a la exploradora.

Kirchner, coautor de este artículo, y Axel Michelsen, de la Universidad danesa de Odense, dieron una respuesta parcial a esta cuestión hace varios años. En sus experimentos, Michelsen y Kirchner dirigieron un haz de láser al panal cerca de una abeja que danzaba, para determinar si los sonidos de la danza generaban o no vibraciones en la estructura. Las vibraciones superficiales, de presentarse, producirían minúsculos cambios en la luz reflejada desde el panal.

Con ese montaje podían medir las vibraciones sin tocar el panal, ni desencadenar temblores adicionales. Las mediciones revelaron que las abejas danzarinas no sacudían el panal; sí lo hacía, en cambio, su audiencia. A veces, los insectos atraídos por la danza emitían un corto chirrido presionando contra el panal con el tórax. Esta acción provoca que el panal vibre lo suficiente como para que la danzarina detenga sus movimientos; ésta distribuye entonces mínimas porciones del alimento que ha recolectado para que su audiencia conozca no sólo la dirección y la distancia al lugar donde se encuentra la comida, sino también el sabor y el olor de la misma.

Pese a lo sugerente del resultado, seguíamos sin saber si las abejas melíferas oían o no los sonidos que la exploradora emitía durante su recorrido contoneante. Parecía probable que los sonidos estuvieran implicados en la comunicación de la danza. Y los analizamos detenidamente. Descubrimos dos primeros datos: la abeja exploradora emitía los sonidos de la

danza mediante el batimiento de sus alas diminutas y las abejas seguidoras se situaban bastante cerca de ella mientras lo hacía. Acordes con tales observaciones, nuestras mediciones del sonido debían realizarse en la misma proximidad.

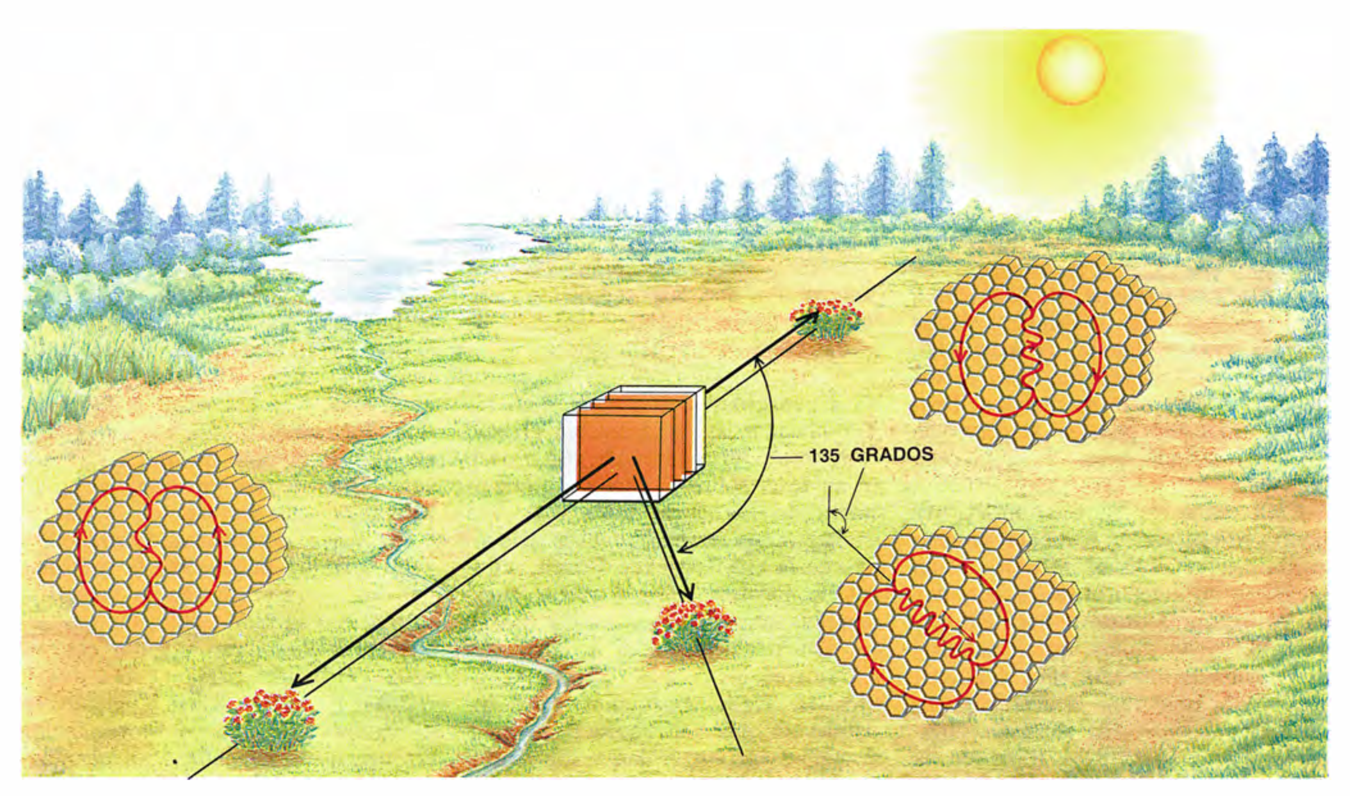
En una ulterior colaboración con Michelsen, registramos los cambios en la presión del aire y los movimientos de las partículas del aire en la proximidad de la danzarina. (A diferencia del oído humano, el de ciertos insectos no responde a presiones sonoras, sino que reacciona a las oscilaciones, en sentido posteroanterior, de las moléculas de aire del entorno.) Vimos que los cambios de presión que una abeja danzarina produce cuando bate sus alas son bastante pequeños (lo que sin duda explica por qué los oídos de los científicos, sensibles a la presión, tardaron tanto tiempo en detectarlos). Pero encontramos movimientos significativos de aire a unos pocos milímetros de las alas vibrantes de la danzarina. Todo ello nos indujo a concluir que las seguidoras de la danza producen sonidos provocando la vibración del panal, en tanto que la exploradora transmite sus propias señales sonoras exclusivamente a través del aire. Por eso mismo, los ruidos procedentes de las instrucciones de la exploradora no se ahogan con los que llegan de las solicitudes de sus seguidoras.

Dos grupos de investigación, cada uno con su propio enfoque experimental, sometieron a prueba la hipótesis según la cual la exploradora transmite acústicamente la información de la danza. En la primera línea de investigación, Kirchner y Kathrin Sommer, alumna de doctorado de la Universidad de Würzburg, modificaron los sonidos de la danza por el método expeditivo de recortar las alas de la danzarina. Al presentar entonces una menor superficie de vibración, las alas producen sonidos de tono más alto y amplitud menor.

Sommer se encontró con que las abejas de alas recortadas continuaban forrajeando y danzando sin mayores problemas. Pero no lograban reclutar a compañeras de colmena. Les ocurría lo mismo que a las abejas de una estirpe mutante, llamada "alas diminutas", que no reclutan seguidoras aunque vuelan y danzan normalmente; la pequeñez alar no es aquí experimental, sino congénita. Sommer estudió una colonia de abejas melíferas, la mitad abejas normales y la otra mitad abejas de alas diminutas. Observó que las abejas danzarinas normales reclutaban por igual abejas normales y de alas cortas; las abejas danzarinas mutantes, por contra, reclutaban mal a los representantes de ambas estirpes.

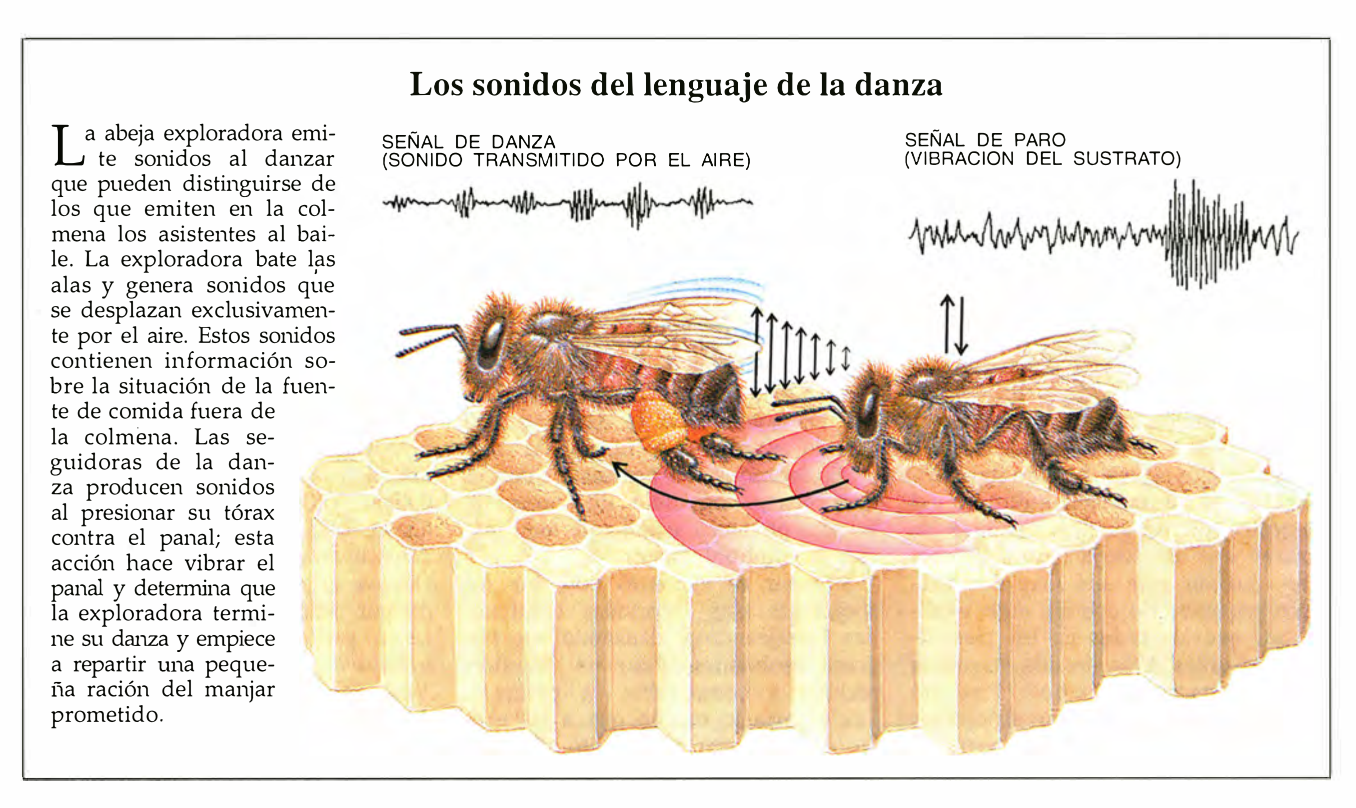
En el segundo enfoque experimental, protagonizado por Michelsen y Kirchner, se empleó un remedo de abeja, capacitado para realizar las danzas de las abejas. No era la primera vez que la investigación acudía a robots apiarios, pero ninguno de los dispositivos diseñados hasta entonces emitía los sonidos correctos de la danza. Valía la pena intentarlo de nuevo. Michelsen y sus colaboradores construyeron en la Universidad de Odense el modelo de abeja controlado por ordenador. Durante cinco veranos bailó en Würzburg, lugar de trabajo de Kirchner.

El equipo de Michelsen creó de latón el artilugio y lo revistió con una delgada capa de cera de abejas. La abeja de latón es algo mayor que una obrera de abeja melífera. Para obtener un par de alas cortaron una hoja de afeitar a la medida adecuada; luego se hacen vibrar pellizcando un alambre tirante que las conecta a



3. DANZA DE CONTONEO realizada sobre las láminas verticales de los panales que penden de la colmena; el baile sigue el recorrido de un ocho. En cada lazada, la abeja danzarina se contonea sólo cuando se halla encarada en la dirección de la fuente de alimento en relación al Sol. Si el alimento puede encontrarse volando hacia el Sol, la abeja danzarina se contonea dirigiéndose hacia arriba. Si el alimento se encuentra a 135 grados a la derecha del Sol, se contonea mientras se encara en la dirección de 135 grados a la derecha; si el alimento puede descubrirse volando en dirección contraria al Sol, entonces se contonea mientras se halla cabeza abajo. El ritmo del baile revela la distancia que media entre el alimento y la colmena: cuanto más rápida es la danza, más cercana se encuentra la fuente de comida.

Los sonidos del lenguaje de la danza



La abeja exploradora emite sonidos al danzar que pueden distinguirse de los que emiten en la colmena los asistentes al baile. La exploradora bate las alas y genera sonidos que se desplazan exclusivamente por el aire. Estos sonidos contienen información sobre la situación de la fuente de comida fuera de la colmena. Las seguidoras de la danza producen sonidos al presionar su tórax contra el panal; esta acción hace vibrar el panal y determina que la exploradora termine su danza y empiece a repartir una pequeña ración del manjar prometido.

un electroimán. Si queremos que el robot gire, inducimos un movimiento de rotación en la varilla que lleva fija en el dorso. Hay un motor de fases en el extremo opuesto de la varilla que dirige automáticamente las rotaciones del modelo durante su danza del ocho. Este mismo motor hace que el modelo se contonee de un lado a otro. Un trazador x-y, conectado a una camisa metálica deslizante (que rodea la varilla), mueve la "abeja" hacia delante, hacia atrás, a la derecha o a la izquierda, según nos interese. Lleva incorporado un tubo de plástico que termina cerca de la cabeza, para suministrar trazas de alimento (solución de sacarosa), que sale de una jeringa. Otro motor de fases regula este mecanismo. Desde un ordenador personal se controlan los motores, que a su vez gobiernan la danza.

Cada sesión experimental duraba tres horas. Michelsen y Kirchner comenzaban perfumando el modelo y sus muestras de agua azucarada con una suave fragancia floral; colocaban luego cebos en el campo, que rezumaban ese mismo aroma. De cada cebo, un observador registraba el acercamiento de abejas en busca de alimento, atraídas por las cantidades traza de la fragancia. Los resultados confirmaban una y otra vez la capacidad de la danzarina mecánica de reclutar abejas reales, vivas. Y éstas, en su mayoría, acudían invariablemente al cebo situado en la dirección indicada por los pasos de baile del mecano.

A estos experimentos siguieron otros en los que intervenía también el robot y cuyo objetivo era determinar la importancia de diversos aspectos del baile para los asistentes. En algunos ensayos, por ejemplo, el mecano suministraba muestras de alimento, pero no danzaba; resultaba entonces que bajaba muchísimo el número de reclutas que se arriesgaban a volar hacia el cebo señalado. Y no conseguía movilizar a ninguna abeja cuando sus alas metálicas no vibraban. Si las danzas silentes no ejercían ninguna atracción, quedaba demostrado que los sonidos constituían parte esencial del lenguaje de la danza de la abeja melífera.

La capacidad del modelo para reclutar a las residentes en el nido corroboraba el acierto de von Frisch en su tesis sobre la función comunicativa de la danza. Pese a lo que muchos consideraban pruebas palmarias de la teoría de von Frisch, algunos de nuestros colegas habían cuestionado antes que las abejas usaran los datos de distancia y dirección cifrados en las danzas. Wenner y Patrick H. Wells, entre otros, han insistido en que las coordenadas que se suministran en la danza sólo representan correlaciones; no son señales genuinas. Creen que los reclutas fían exclusivamente en los olores para encontrar la fuente alimentaria.

El propio von Frisch se había esforzado ya por someter a comprobación experimental el significado de los movimientos de la danza. En su empeño, descubrió que los reclutas perdían el hilo de la búsqueda de la fuente alimentaria si él disponía la colmena horizontalmente, de lado. La maniobra impedía que la danzarina empleara la gravedad para orientar la dirección de su recorrido contoneante. En consecuencia, los atraídos por la danza no podían interpretar correctamente sus movimientos.

James L. Gould, de la Universidad de Princeton, desmontó posteriormente la hipótesis del olor. Demostró que una exploradora podía enviar a sus compañeras de nido hasta un lugar donde jamás estuvo. Tal proeza sería imposible si los reclutas fiaran sólo en el olor para encontrar la ruta hasta el foco alimentario. Pero sí podría ocurrir en el caso de que las abejas seguidoras dieran prioridad a la información que recibían de la danza.

En sus experimentos, Gould colocaba una luz intensa en la colmena, que las concentradas en la danza tomaban por el Sol, confusión que les inducía a una interpretación equivocada del baile. Estas abejas descarriadas buscaban frecuentemente en el campo utilizando la información errónea de la danza y parecían ignorar otras señales, el olor por ejemplo. De ese fenómeno Gould dedujo que era evidente que preferían el mensaje suministrado por la danza a las otras señales. Por último, los experimentos con el modelo confirmaron la hipótesis de von Frisch: las danzas

representan, efectivamente, una elaborada forma de comunicación.

La abeja robot nos ha ayudado a contestar otras cuestiones planteadas por las observaciones de von Frisch. Entre ellas, establecer qué componentes del lenguaje de la danza representan determinados tipos de instrucciones. Por ejemplo, cuando el mecano danzaba de suerte tal que su trayectoria contoneante cayera en el exterior de la figura en ocho, los reclutas seguían la dirección indicada en el recorrido contoneante, y no la descrita por la orientación del ocho. Así pues, la trayectoria contoneante, durante la cual se producen sonidos, informa por sí sola a los reclutas de la dirección en la que pueden encontrar alimento.

Aunque los experimentos en que participaban el modelo o las abejas de alas diminutas confirmaron que los sonidos de la danza constituían una parte importante del lenguaje de la danza, faltaba un elemento crucial del cuadro: la identidad de las estructuras a través de las cuales las abejas oyen los sonidos transmitidos por el aire. Algunos intentos que se habían acometido con anterioridad para resolver el problema habían demostrado que no parecía que las abejas pudieran oír en absoluto. Pero ahora sabíamos que los sonidos de la danza se transmitían exclusivamente por el aire. Valía, pues, la pena retomar la cuestión. En las pruebas consiguientes empleamos sonidos muy similares a los que emiten las abejas danzarinas.

En una primera serie de experimentos, entrenamos a las abejas para que asociaran un sonido, de cinco segundos de duración, con una descarga eléctrica muy suave, que llegaba cuatro segundos después del inicio del sonido. Generábamos el sonido en el extremo abierto de un tubo de vidrio, muy estrecho. La descarga por sí sola, aplicada mientras la abeja comía, provocaría que ésta se apartara del comedero durante unos segundos; poco después volvería para continuar la pitanza. Ahora bien, nos preguntamos entonces, si una abeja experimenta repetidamente un tono seguido por un estímulo adverso, ¿acabará por aprender a retirarse del comedero durante los primeros cuatro segundos del sonido, antes de la descarga? Si la respuesta era afirmativa, significaba que podía oír (y, desde luego, aprender). Comprobamos que se puede adiestrar a las abejas para que respondan a sonidos transmitidos por el aire; la verdad es que aprendieron muy lentamente.

Andando el tiempo, optamos por una técnica de adiestramiento distinta. En el nuevo planteamiento, la abeja entraba en un laberinto elemental, en forma de Y. Producíamos un sonido en un extremo de este comedero de dos brazos. El extremo del que procedía el sonido cambiaba impredictiblemente de una prueba a la siguiente. Si la abeja se dirigía al sonido, recibía una recompensa de agua azucarada; si se alejaba del sonido, no recibía nada. Las abejas aprendieron rápidamente a encaminarse hacia el origen del sonido. Claudia Dreller, doctoranda de la Universidad de Würzburg, empleó este procedimiento para averiguar la frecuencia y la gama de amplitudes en que las abejas oyen; demostró que las abejas sólo son sensibles a las frecuencias bajas, las inferiores a 500 hertz. Oyen estos tonos con la sensibilidad suficiente para advertir los sonidos de una compañera de colmena danzante, que van de los 250 a los 300 hertz. El trabajo de Deller reveló también la capacidad que poseen de discriminar entre frecuencias de esa gama; pueden discriminar entre sonidos de tono bajo (20 hertz), medio (100 hertz) y alto (320 hertz). Ignoramos para qué les sirve a las abejas la postrera facultad.

La misma técnica de adiestramiento nos permitió identificar las estructuras sensoriales a través de las cuales las abejas detectan los sonidos. Alteramos la integridad de algunas de nuestras abejas adiestradas, mediante la extracción de una antena, la inmovilización de una determinada articulación antenal o la remoción de pelos sensoriales de la cabeza. Y así descubrimos que las abejas emplean el órgano de Johnston, una estructura cordotonal constituida por neuronas en el segundo artejo de las antenas,



4. ROBOT DANZARIN (*izquierda*); **reclutó con éxito a sus compañeras de nido para ir a alimentarse lejos de la colmena. Los investigadores colocaron ocho cebos alrededor de la colmena y programaron al mecano para que danzara con referencia a un lugar. Los observadores en el campo registraron el acercamiento de las abejas buscadoras. La mayoría de las que el robot reclutó se dirigieron al cebo indicado por su danza (*dos de las pruebas se muestran a la derecha*).**

para detectar sonidos transmitidos por el aire. Algunas moscas y mosquitos se basan en la misma estructura para percibir sonidos.

Si ahora reunimos todas las piezas, nos haremos una idea cabal de cómo opera el lenguaje del baile. La danzarina emite señales sonoras que ayudan a las residentes a determinar dónde se halla la danzarina y cómo se mueve, lo que, a su vez, les proporciona información básica sobre la dirección y la distancia del foco de alimentación. Los que asisten a la danza reciben esta señal a través de los órganos de Johnston localizados en sus antenas, que siempre se mantienen cerca de la danzarina. Puesto que se trata de órganos bilaterales (uno a la derecha y otro a la izquierda) las seguidoras pueden usarlos para juzgar su posición con respecto a la danzarina y, por tanto, comprender la dirección hacia el alimento. Al mismo tiempo, las seguidoras emiten sonidos que hacen vibrar la colmena. La exploradora detiene su danza cuando recibe estas señales y ofrece muestras del alimento que ha recolectado. Estos aperitivos aportan a las seguidoras datos adicionales sobre el sabor, el olor y la calidad de la fuente de alimento. Las abejas asisten a la danza durante un tiempo y echan luego a volar para encontrar la fuente de alimento por su cuenta. Si tienen suerte, hallarán la comida; si fracasan, volverán a la colmena y lo intentarán de nuevo.

Este lenguaje de la danza constituye un sistema de reclutamiento muy complejo y desarrollado. Para comprender cuánto ha evolucionado este sistema, hemos examinado las técnicas de reclutamiento de especies emparentadas. El género *Apis*, al que pertenecen todas las abejas melíferas, no tiene parientes cercanos actuales. Los abejorros y las abejas inermes son sus parientes más próximos. No parece que los abejorros recluten en absoluto. Pero hay muchas especies de abejas inermes que sí reclutan; aunque, hasta donde sabemos, ninguna ha desarrollado un lenguaje simbólico similar al lenguaje de la danza de *Apis*.

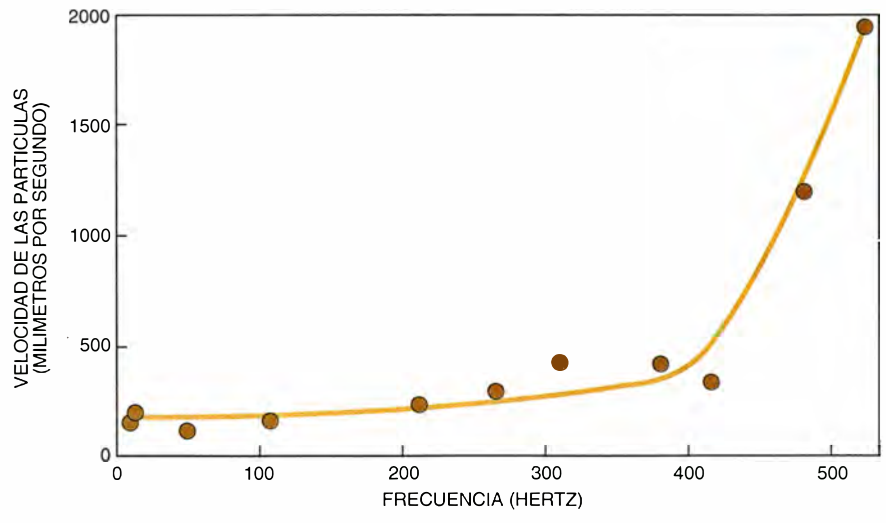
Las cuatro especies de abejas melíferas estudiadas hasta ahora (tres de las cuales viven en Asia) hablan alguna variante del lenguaje de la danza. Como Martin Lindauer descubrió







5. LOS HABITOS DE NIDIFICACION pudieron haber influido sobre la evolución del lenguaje de la danza, según lo hablan diferentes especies de abejas melíferas. *Apis florea* (*izquierda, abajo*), considerada de comportamiento más primitivo, no produce sonidos al danzar. Estas abejas anidan al aire libre y sólo bailan durante el día. *A. dorsata* (*arriba*) emite sonidos de danza, al igual que *A. cerana* (*izquierda, arriba*) y la familiar abeja melífera occidental, que por lo general danzan en nidos oscuros.



6. LA GAMA DE FRECUENCIAS de los sonidos que una abeja puede detectar se extiende muy por debajo de la gama que oye el oído humano. El gráfico muestra la rapidez con que deben desplazarse las partículas de aire cerca de las alas de una danzarina para generar señales audibles. Dentro de esa gama, las abejas muestran capacidad para discriminar entre sonidos que poseen frecuencias diversas.

en los años cincuenta, cuando estaba en la Universidad de Munich, todas las especies emplean códigos similares para la distancia y la dirección, aunque existen algunas diferencias.

Hemos buscado sonidos de danza en cuatro especies de abejas melíferas; de ellas, sólo tres los producen. Las tres especies comparten algún rasgo más: todas deben danzar ocasionalmente en la oscuridad. Dos de ellas, la abeja occidental, *Apis mellifera*, y la abeja asiática, *A. cerana*, anidan en lugares oscuros y cerrados, como oquedades de los árboles y cavidades similares. La tercera productora de sonidos, la abeja gigante, *A. dorsata*, anida al aire libre en panales laminares solitarios, que cuelgan de salientes rocosos o de gruesas ramas de árbol. Debemos a Fred C. Dyer, de la Universidad estatal de Michigan, la revelación de que *A. dorsata* danza a veces durante la noche; Kirchner ha descubierto muy recientemente que esta abeja produce sonidos. Las señales de *A. dorsata* fueron muy difíciles de detectar por su tono, notablemente bajo.

La única especie que danza en silencio, la abeja enana, *A. florea*, baila al aire libre como *A. dorsata*, pero sólo durante el día. Las danzarinas de esta especie realizan gestos que pueden, en plena luz solar, servir de señales visuales para atraer a las seguidoras, lo mismo que los sonidos ayudan a las abejas que danzan en la oscuridad. Hay indicios de que los hábitos de *A. florea* son los más primitivos; apoyados en ellos, suponemos que el complicado sistema de comunicación acústica de las otras tres especies evolucionó verosímilmente a partir de un despliegue visual, y surgió cuando estas abejas crearon habitáculos que las apartaron de la luz.

Ahora que, por fin, podemos oír el lenguaje de las abejas y hasta balbucearlo, surge un racimo de nuevas preguntas. Importa, por ejemplo, conocer para qué les sirve a las abejas el poder discriminar entre sonidos de tono distinto. Cabe, asimismo, la posibilidad de que empleen sonidos similares, transmitidos por el aire, de formas que hoy ni siquiera sospechamos. Con la esperanza de sacar a la luz hasta el último secreto de su sistema de comunicación, seguiremos escuchando furtivamente sus conversaciones.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE SOCIAL BEHAVIOR OF THE BEES. C. D. Michener. Harvard University Press; 1974.

EVOLUTION OF INSTINCT: COMPARATIVE ETHOLOGY OF HYMENOPTERA. Kunio Iwata. Editado por Amerind Publishing Co., para la Smithsonian Institution y la National Science Foundation; Nueva Delhi, 1976.

THE DANCE LANGUAGE AND ORIENTATION OF BEES. K. von Frisch. Harvard University Press. 1967.

COMMUNICATION AMONG SOCIAL BEES. Martin Lindauer. Harvard University Press. 1971.

THE HONEY BEE. James L. Gould y Carol G. Gould. Scientific American Library, 1988.

ACCOUSTICAL COMMUNICATION IN HONEYBEES. W. H. Kirchner en *Apidologie*, volumen 24, número 3, páginas 297-307; julio de 1993.

La salud del mar Mediterráneo

¿Está amenazado de muerte el Mediterráneo? No, pero los efectos del hombre, desde la pesca hasta la ocupación y transformación del litoral, pasando por la contaminación, se dejan sentir en todo su perímetro

Joandomènec Ros

Entre las diversas campañas promovidas para la salvación de especies y ecosistemas exóticos suele pasar inadvertida una preocupación de mayor alcance, que se diría restringida a los círculos académicos. Por paradójico que parezca, somos más sensibles a la preservación de la Amazonía que a la integridad del mar que ha configurado en buena medida la historia de Europa. Pero, ¿es verdad que está enfermo el *mare nostrum*? ¿Y qué significa esa expresión?

El océano se ha considerado, desde siempre, almacén inagotable de recursos y pozo sin fondo capaz de cargar con los desechos de la humanidad. Parece aceptar todo cuanto, por aire, ríos y glaciares, le llega desde tierra firme; lo digiere e incorpora a los sedimentos o a las aguas (el mar es salado, en parte, por el lavado de las rocas continentales). Entrada a la que debemos sumar los desechos antropogénicos, cuya cadencia de aflujo en los últimos años se ha acelerado.

Para calibrar los efectos perturbadores que los factores antropogénicos ejercen sobre el ecosistema marino, se puede considerar que se trata de una relación simple entre el perímetro costero (unidimensional), de donde procede la mayoría de esos efectos perturbadores, y la superficie (bidimensional) o el volumen (tridimensional) del mar, receptores de tales efectos. La relación de perímetro a superficie o volumen se hace tanto más desfavorable cuanto más pequeño es un mar.

Y el Mediterráneo es un mar pequeño que sufre una intensa presión por parte del hombre. En la veintena de países que rodean su cuenca de 3 millones de kilómetros cuadrados, la población costera se estima en 90 millones de habitantes, cifra que puede duplicarse para el año 2025. Lo mismo ocurrirá con la población flotante, que ahora es de 120 millones.

La acción del hombre se concentra sobre todo en el litoral. Para ahondar en esa interacción, veamos qué sucede en una ciudad ribereña típica: Barcelona. Las aguas y los fondos marinos situados frente a la ciudad reciben vertidos domésticos, agrícolas e industriales, procedentes de la red de alcantarillado urbano, de los ríos Besós y Llobregat y de buen número de emisarios submarinos, que alteran las características físicas, químicas y biológicas de agua y sedimentos y que afectan a la biota y a las comunidades marinas. Las aguas contaminadas del Besós se depuran, lo que permite reutilizarlas o verterlas al mar limpias; pero los residuos sólidos (o lodos de depuradora) contienen cantidades elevadas de materia orgánica, metales pesados y moléculas orgánicas sintéticas, difícilmente biodegradables, amén de otros materiales inorgánicos.

Por disparatado que parezca verter al mar materiales de desecho cargados de contaminantes, no hay muchas opciones más: ni la incineración, ni el almacenamiento a cielo abierto ni el enterramiento solucionan el problema de la reintroducción en el medio de los contaminantes. En cambio, la deposición en el mar, después de un proceso de cloración y compactación, y sobre fondos profundos y alejados de la costa, ha constituido la manera menos mala de inmovilizar los contaminantes y detraerlos de la circulación.

El estudio sedimentológico de la zona de recepción de dichos lodos ha revelado que forman una enorme lenteja, que se extiende entre los 50 y los 60 metros de profundidad, a una distancia de unos 5 km de la costa, y que ocupa una extensión aproximada de 5 km por 2 km. El espesor de la capa de lodos a la salida del emisario submarino que los transporta a este punto del fondo marino desde la costa es de unos 2 metros, y se reduce a medida que se pasa de la boca del emisario al perímetro de la lenteja. El que los fangos recubran el fondo marino podría sugerir que el depósito está inmovilizado. No hay tal. En la dirección del eje longitudinal del depósito, que corre paralela a la costa, la corriente dominante, del NE, impele y esparce hacia el SW estos materiales.

Además, estos lodos no son inertes, sino que acarrean una elevada concentración de metales pesados, bifenilos policlorados (PCB) y restos de biocidas de todo tipo. Las pocas especies de animales resistentes que viven sobre estos fondos contaminados (los gusanos poliquetos *Capitella capitata* y *Malacoceros fuliginosus* y el crustáceo tanaidáceo *Iphinoe rhodaniensis*) concentran los tóxicos; esas especies se hallan en la base de redes alimentarias litorales, por las que se extienden las moléculas tóxicas hasta llegar, concentradas, a los superdepredadores (biomagnificación) y al propio hombre. La pretendida inmovilización de estos sedimentos muy contaminados es, pues, sólo parcial. Añádase a ello el empobrecimiento y simplificación de las comunidades marinas, pues sólo las especies más tolerantes a la contaminación resisten.

Esa situación puede generalizarse a todas las grandes urbes mediterráneas, de Marsella a Atenas pasando por Nápoles y Argel. Las características de los vertidos varían en función de la importancia de los efluentes industriales, agrícolas o urbanos,

JOANDOMENEC ROS es catedrático de la Universidad de Barcelona. Su campo de investigación se ha centrado en la ecología de los moluscos opistobranquios y del bentos marino mediterráneo, cuyas comunidades ha estudiado en el levante español. Se ha ocupado asimismo de evaluar el impacto ecológico que sobre el medio marino producen diversas actividades humanas (construcción de puertos, regeneración de playas, contaminación y otros).

o de si los vertidos son de aguas contaminadas que se mezclan con las del Mediterráneo, o bien si, como en el caso de Barcelona, se vierten lodos sobre fondos profundos, pero el resultado es siempre el de un aporte importante de materiales tóxicos, de difícil metabolización.

La contaminación litoral de origen urbano, agrícola e industrial no es la única; también incide la minería. Citemos, a este propósito, otro ejemplo tomado de la ribera occidental. Durante muchos años, el mineral triturado procedente del lavado de la ganga metálica que se extrae de la Sierra de Cartagena (cuencas mineras del sureste español) se depositaba en el interior del Mar Menor, una de las mayores lagunas litorales del Mediterráneo. Hace una treintena de años cesaron los vertidos a la laguna, porque su cubeta meridional, somera, se estaba llenando con los estériles de minería. Los vertidos se derivaron hacia el Mediterráneo, en las inmediaciones del pueblecito de Portmán.

Portmán fue desde antiguo (*Portus magnus* le llamaban los latinos) un puerto pesquero de importancia. A comienzos de los años sesenta, el vertido de 7000 toneladas diarias de estériles de minería empezó a rellenar primero el puerto, después toda la bahía y, finalmente, se esparció por la plataforma, hasta llegar al talud continental, a los 100 metros de profundidad y a varios kilómetros de la costa. La línea de costa se ha adentrado casi un kilómetro en el mar.

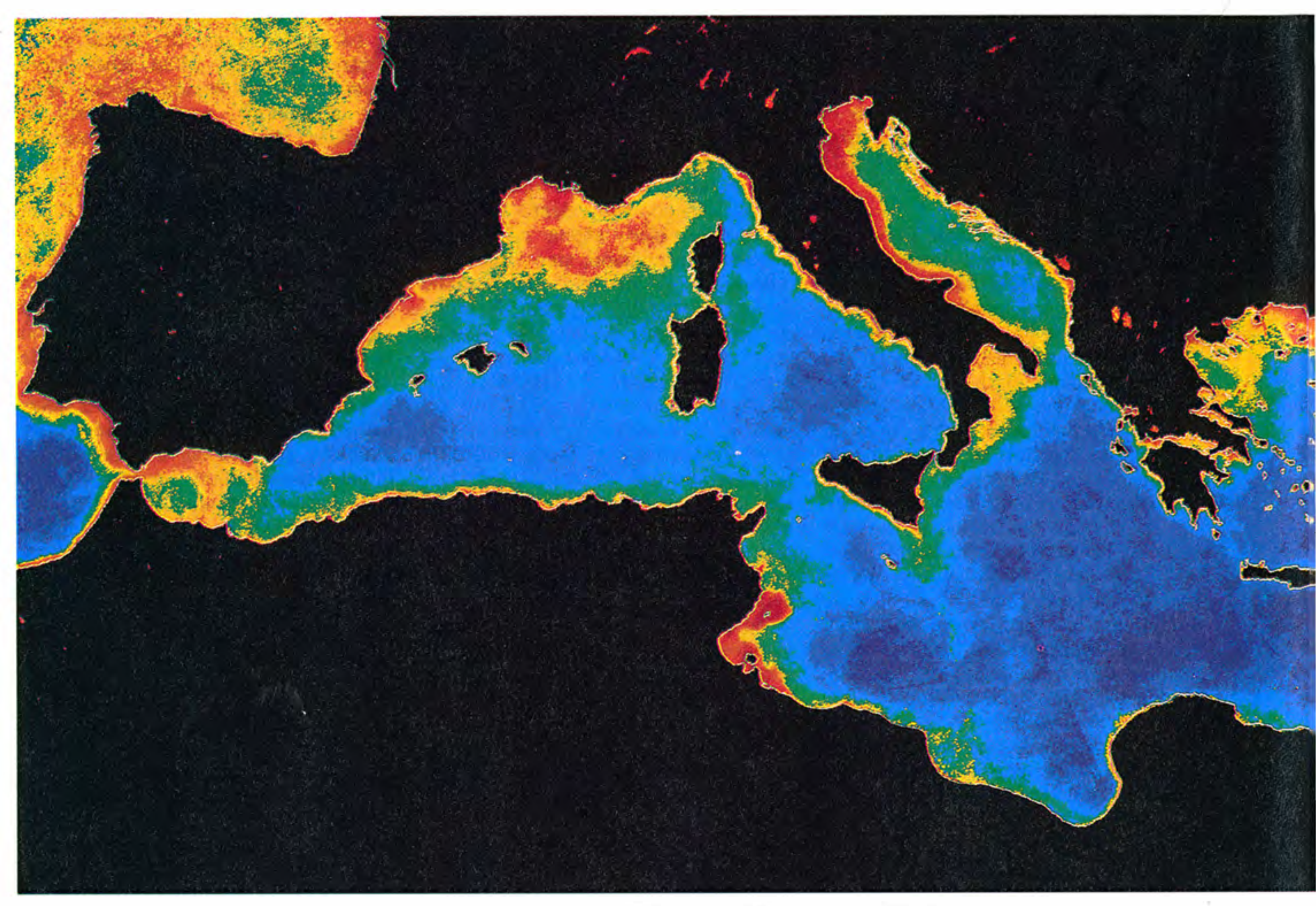
Este vertido, equivalente al de un río mediterráneo, afecta no sólo al poblamiento humano, sino también al biológico. El material de desecho que constituye los estériles de minería está cargado de metales pesados (zinc, plomo y cadmio, pero también manganeso, hierro y mercurio). En un abanico que se extiende unos 3 km hacia el E y unos 5 km hacia el S y el W de Portmán, la fauna y la flora marinas que todavía resisten el enterramiento por los estériles, las comunidades empobrecidas que éstas forman y muchas especies de interés pesquero están contaminadas. La pradera de *Posidonia oceanica*, la comunidad más rica y diversa de los fondos blandos someros mediterráneos, presenta frente a Portmán un hiato de unos 10 km.

Se ha dicho que Portmán es el punto más negro de todo el Mediterráneo en lo que se refiere a contaminación por metales pesados. El 93,75 % de todos los vertidos industriales que se hacen a lo largo del litoral mediterráneo español salían hasta 1990 (cuando la explotación minera cesó) por el emisario a cielo abierto de Portmán; se estima que la antigua bahía contiene 50 millones de toneladas de residuos de minería, que en algunos lugares alcanzan los 25 m de potencia. Durante los treinta años que duraron los vertidos, las aguas frente a la bahía parecían puré de guisantes, debido al finísimo material en suspensión, lo que interfería con la dinámica normal del plancton y de los peces y producía también un resultado insólito: la "subida" a cotas batimétricas someras de especies de animales que habitan a gran profundidad, en ambientes oscuros.

A esos dos puntos localizados de emisión (ciudades y cuencas mineras) hemos de agregar una tercera fuente, aleatoria: las mareas negras.

1. ELEVADA BIODIVERSIDAD del Mediterráneo, representada en el mosaico de "los peces" procedente de la villa romana de La Pineda, en Tarragona (España), de principios del siglo tercero de nuestra era. Esa riqueza de especies contrasta con la reducida producción biológica.





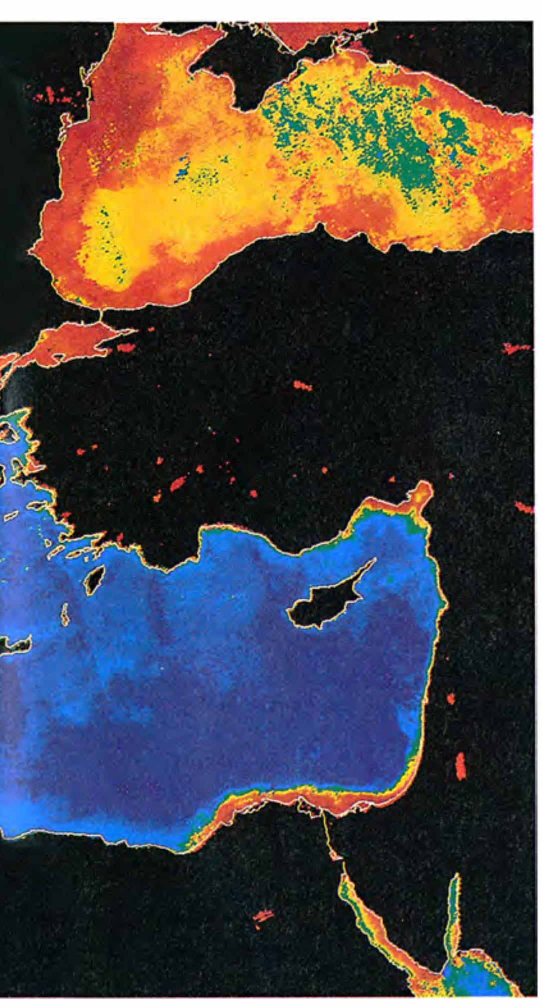
La superficie del Mediterráneo es aproximadamente el 1 % de la de todos los océanos, pero por sus rutas comerciales circula cerca del 30 % del petróleo mundial.

Se ha prohibido la limpieza de sentinas en mar abierto, pero todavía son pocos los puertos que poseen instalaciones adecuadas para rebañar el petróleo de los tanques de los grandes buques petroleros, y la práctica no está completamente erradicada. Las pérdidas de crudo de los petroleros, sumadas a los escapes de las refinerías costeras, el goteo de gasóleo y gasolina de las embarcaciones, las pérdidas de carburante y de aceites lubricantes de vehículos terrestres (que acaban llegando al mar a través de la atmósfera o de los ríos), todo ello produce una contaminación más sutil, pero también más importante (la relación es de 10 a 1) que la originada por las catástrofes espectaculares que sufren los petroleros. Se estima que cada año llegan al Mediterráneo unas 650.000 toneladas de hidrocarburos.

El efecto local de un vertido accidental y masivo provocado por el encallamiento o rotura de un petrolero es notable. Una vez en el mar, los hidrocarburos se degradan muy lentamente; excepción hecha de las fracciones más tóxicas, que son volátiles o se diluyen pronto en el agua, la mayor parte del petróleo vertido se va convirtiendo en alquitrán y otros productos recalcitrantes, también tóxicos. Estudios realizados en comunidades marinas afectadas por vertidos de petróleo señalan estas consecuencias: muy graves para los organismos bentónicos, las aves y los mamíferos; menos graves para el plancton y los peces pelágicos (pero éstos se comen las bolitas de alquitrán y mueren envenenados). Además, el alquitrán desaparece de la superficie del agua, pero permanece mucho tiempo sobre el fondo marino o es arrastrado a gran distancia por las corrientes; las comunidades originales tardan muchos años (quizá más de 20) en recuperarse, aunque a los pocos meses algunos organismos oportunistas pueden constituir comunidades más sencillas; los detergentes empleados para disolver el petróleo son más perjudiciales que el propio crudo.

Algunas de las características que diferencian al Mediterráneo de los grandes océanos (ausencia de mareas importantes, oleaje reducido, poca producción biológica, elevada biodiversidad) son las que contribuyen a multiplicar el daño infligido aquí por las mareas negras. Las pesquerías de peces de fondo, la acuicultura de moluscos filtradores, los viveros para todo tipo de fauna que son las praderas de *P. oceanica*, los usos lúdicos de las playas son otros tantos recursos que pueden resultar afectados y no recuperarse hasta pasado largo tiempo. Hace tres años, el petrolero *Haven* se hundía en el golfo de Génova; aunque había producido una pequeña marea negra, conservaba parte de su carga de crudo en los depósitos. Además del efecto inmediato, no sólo local (la corriente que baña el mar Ligur arrastró el alquitrán a grandes distancias, hasta la Costa Azul francesa y más allá), una parte del petróleo ha estado saliendo continuamente del petrolero hundido. Y el del *Haven* ha sido sólo uno de la media docena de accidentes que se produce cada año en el Mediterráneo.

Pero la contaminación presenta, como Jano, otra cara. Parte de los contaminantes que llegan al Mediterráneo tienen un efecto fertilizante de sus aguas azules, pobres en nu-



2. MAR AZUL, MAR POBRE. El Mediterráneo aparece en esta imagen, compuesta a partir de 30 fotografías de satélite parciales obtenidas en mayo de 1980, como un mar de aguas pobres, excepto en determinadas zonas. Corresponden éstas a áreas de producción natural elevada (giro del mar de Alborán, frentes catalano-balear y liguro-provenzal, litorales fertilizados por los aportes del Ebro, el Ródano, el Po y el Nilo, áreas someras cubiertas de fanerógamas marinas del golfo de Gabés), o bien a regiones en las que la producción se debe a la eutrofización de origen humano (sobre todo mares Adriático y Negro). Los colores más cálidos (*rojos*) corresponden a las mayores concentraciones de clorofila, el pigmento fotosintético del fitoplancton y los macrófitos, y los más fríos (*azules*) a las aguas más pobres en clorofila.

trientes y, por tanto, en producción biológica. Los nutrientes que los grandes ríos transportan al mar están en el origen de pesquerías de peces pelágicos basados en la producción planctónica (tal la sardina). Con el advenimiento de los abonos químicos y de los detergentes con fosfatos, los aportes de nutrientes se han multiplicado, y algunas subcuencas mediterráneas especialmente cerradas, así el Adriático, son incapaces de digerir este exceso de fertilizantes.

Los episodios de eutrofización del Adriático norte no son recientes, pero en los últimos años han revestido una importancia tal y han causado tales daños al turismo y las pesquerías de la región, que se ha puesto en marcha un plan de saneamiento de la cuenca del Po (cuyos aportes suponen el 80 % del problema) y de depuración de los vertidos. La contaminación orgánica del Adriático produce en primavera crecimientos masivos de algas unicelulares en la columna de agua, diatomeas sobre todo, que generan grandes cantidades de polisacáridos (mucílago), y de algas pluricelulares nitrófilas *(Ulva, Enteromorpha* y otras) en los fondos litorales.

Estas proliferaciones inundan las playas de masas de algas, en perjuicio de la industria turística; también se ve afectada la industria pesquera, al colmatar el "mucílago" de diatomeas las redes de los pescadores. En verano, la putrefacción de las algas acumuladas en los fondos consume todo el oxígeno, lo que crea una capa anóxica que se mantiene durante tiempo y que modifica los poblamientos bentónicos, de modo que sólo las especies más resistentes permanecen. El proceso se repite un año tras otro e impide la recuperación de los fondos; toda la cuenca del Adriático norte sufre estos episodios de proliferación algal, anoxia y mortalidad animal.

Situaciones semejantes se dan en lagunas costeras eutróficas (como las de Venecia o Túnez) o en áreas litorales que reciben aportes importantes de nutrientes (como el sudeste español). En el Mediterráneo oriental, los nutrientes y sus efectos llegan principalmente del mar Negro, eutrófico desde antiguo.

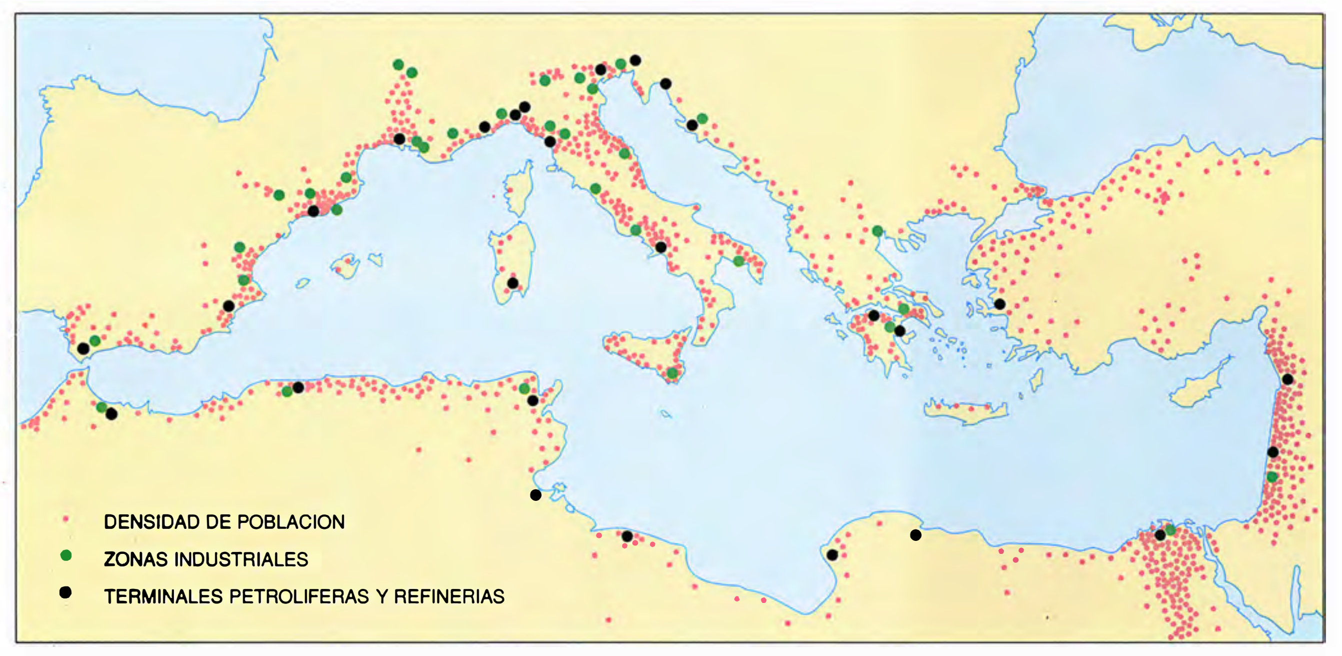
A lo largo del perímetro mediterráneo, la actividad humana que produce una mayor alteración es, sin duda, el turismo. El litoral se está sembrando, a modo de un inmenso continuo, de bañistas, hoteles, urbanizaciones y puertos deportivos. Se quiere duplicar el número de plazas hoteleras, quintuplicar el número de amarres de embarcaciones, renovar la red viaria litoral, regenerar las playas, crear campos de golf, parques acuáticos y otros servicios asociados al ocio. Casi siempre se trata de servicios consumidores de recursos valiosos (como el paisaje o las comunidades biológicas costeras) o de los que se carece (como el agua o la arena de las playas) y, en todo caso, degradadores del entorno.

El litoral balear fue, quizás, el primero en sufrir los efectos del crecimiento caótico del turismo en los años cincuenta, con la acumulación de apartamentos, hoteles, discotecas y otras formas de alteración del paisaje. En razón de ese fenómeno se acuñó el termino "balearización" para designar la banalización del medio: desaparece la diversidad paisajística y cultural, se uniformizan playas y ciudades costeras y se generan problemas de temporada (escasez de agua potable, salinización del freático litoral y aumento de la contaminación costera) que pueden convertirse en crónicos.

La industria del turismo no deja indemne a las comunidades ecológicas litorales. La desaparición de campos de dunas, de marismas costeras y de las praderas de fanerógamas marinas y de su biota es irreversible, como lo ha sido la de determinadas especies: la foca monje, las tortugas marinas, el coral rojo. Los deportes náuticos, la pesca deportiva y submarina y la contaminación son otros tantos azotes para las comunidades litorales. El resultado de la explotación es siempre el mismo: paisajes (en tierra y bajo el agua) monótonos, diversidad biológica baja y proliferación de especies banales en detrimento de las más interesantes.

Aparte de los efectos perjudiciales que sobre las aguas y los fondos litorales y sus comunidades tienen los vertidos del continuo urbano, asimilables a los de una gran ciudad extendida por el litoral, la frecuentación excesiva de las playas supone la eliminación casi total de la vegetación, de la fauna piscícola, de la fauna aviar nidificante (a excepción de las gaviotas argénteas, verdaderas ratas del aire que medran en el litoral y tierra adentro), la ocupación de áreas de puesta en aquellas playas del Mediterráneo oriental a las que todavía van a desovar las tortugas marinas, la contaminación por todo tipo de materiales de desecho, y en especial por hidrocarburos y metales pesados procedentes de las embarcaciones.

Dos tipos de actuaciones de la industria turística sobre el litoral tienen, además, el contrasentido adicional de que generan unos costes económicos a fondo perdido: la construcción desmedida de puertos deportivos y la "regeneración" de playas. Amén del efecto directo de la construcción de un puerto deportivo sobre las comunidades biológicas locales, existen efectos indirectos. Las corrientes litorales, responsables del equilibrio dinámico de los sedimentos costeros, suelen ser desviadas con espigones o escolleras. Muy a menu-



3. FOCOS DE CONTAMINACION Y ALTERACION FISICA del Mediterráneo: zonas industriales, vertidos agrícolas y mineros. Se suceden de forma prácticamente ininterrumpida en la costa noroccidental. Pero es todo el perímetro de este mar el que asiste actualmente a un crecimiento demográfico, turístico e industrial generalizado.

do, el puerto se colmata de sedimentos (y entonces hay que dragarlo periódicamente); las playas inmediatas se vacían de arena (y entonces hay que "regenerarlas"), y las comunidades marinas de la zona, en especial la pradera de *P. oceanica*, acaban arrasadas. La extracción de arena y la remoción de unos fondos marinos normalmente ricos en fauna y flora pueden compararse a lo que ocurre en tierra cuando se labra un campo o se desbroza un bosque.

Dos consecuencias marginales, no directamente ecológicas, derivan de esta "regeneración" de playas. Las arenas se las lleva el mar durante el primer temporal de otoño. Pero antes, estas arenas se han enfangado (su granulometría, su disposición y pendiente sobre la playa no son las naturales, y el drenaje es defectuoso), han desprendido olores nauseabundos (por la putrefacción de la materia orgánica y de los organismos que allí vivían) y han favorecido el crecimiento de algas oportunistas, inocuas pero pegajosas (que proliferan gracias a la abundancia temporal de nutrientes). Las medidas destinadas a mejorar la playa la convierten, ya en la misma temporada estival, en un lugar que el turista evita; a medio plazo, tales actuaciones resultan inútiles. Los millones invertidos se los traga, literalmente, el mar.

¿Por qué pierden arena las playas mediterráneas? Los ríos son los principales suministradores de sedimentos, pero en el último siglo se han construido muchos embalses para abastecimiento agrícola o con fines energéticos. Los sedimentos llegan hoy al mar en mucha menor cantidad porque quedan retenidos en los embalses y, también, porque la construcción extrae arenas y gravas de los lechos de los ríos. Esto se traduce en el retroceso de los deltas (como el espectacular del delta del Nilo y el incipiente del delta del Ebro), el descarnamiento de las playas y, asimismo, el empobrecimiento en nutrientes de las aguas costeras (con efectos negativos para algunas pesquerías, como la de la sardina).

Para paliar tales estragos se han creado parques naturales. Va en aumento el número de áreas que gozan de cierta protección en función de sus características y del tipo de comunidades u organismos que se quiere preservar. En unos casos está prohibida la explotación de peces u otras especies de interés comercial, en otros se impide el paso o el anclaje de embarcaciones, mientras que otras

4. PORTMAN, en el litoral sudoriental de España. Este pueblo pesquero, situado en las estribaciones de una región minera, ha visto colmatada su bahía (media luna entre la línea de costa actual y la antigua), extinguida su actividad pesquera y muy alteradas las comunidades biológicas de su litoral por un prolongado vertido al mar de estériles de minería.

áreas pueden estar cerradas a la visita total o parcialmente. Existen reservas naturales o científicas, parques nacionales, reservas dedicadas a especies concretas, paisajes terrestres y costeros de utilización múltiple y reservas de la biosfera.

La creación y mantenimiento de áreas protegidas puede ser la mejor manera de romper el proceso de balearización. Pero esas áreas deben tener un tamaño suficiente que garantice su papel de protección de especies y comunidades. La visita a las mismas constituye un riesgo para la integridad de éstas. El efecto del anclaje de embarcaciones en el parque nacional de Port-Cros, en Francia, el primero del Mediterráneo (1963) en el que se protegieron los fondos y las comunidades marinas además de las emergidas, se deja sentir perceptiblemente en la pradera de *Posidonia oceanica*, de la que la isla posee uno de los últimos arrecifes-barrera del Mediterráneo: tanto la densidad como el tamaño de las plantas son menores en las áreas de amarre, y la población animal asociada a la pradera se ha reducido.

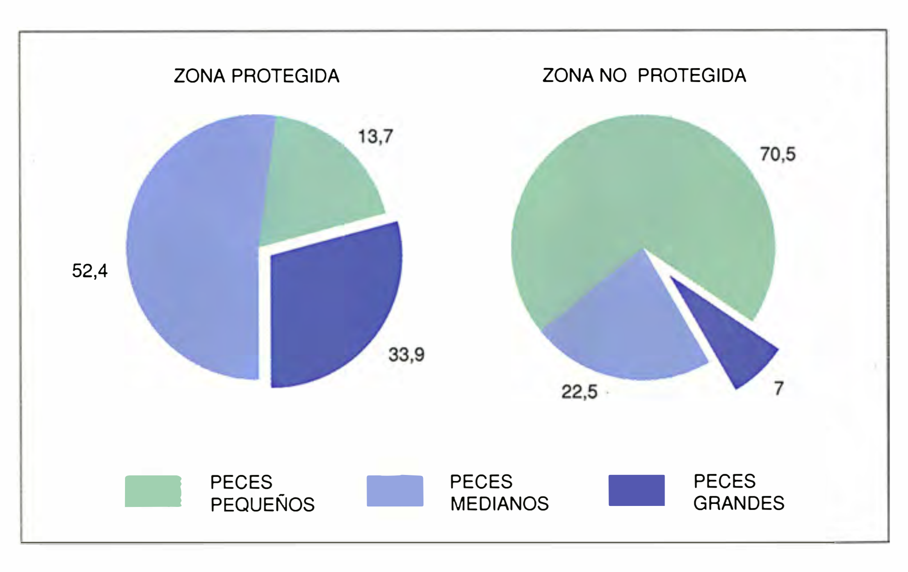


5. CREANDO PLAYAS. La reducción de los aportes sedimentarios naturales al litoral mediterráneo ha descarnado muchas playas. La utilización de potentes dragas suctoras, que extraen arenas de fondos relativamente profundos y alejados y las depositan en el litoral, es una solución efectiva sólo a corto plazo y supone un fuerte impacto sobre los poblamientos infralitorales, en especial la pradera de *Posidonia oceanica* y los fondos de bivalvos comerciales. La estabilidad de la nueva playa suele ser reducida, y su vida corta.

Uno de los pocos estudios exhaustivos sobre el impacto de los visitantes en una reserva submarina se ha llevado a cabo en las islas Medes, un pequeño archipiélago de la Costa Brava (litoral noroccidental del Mediterráneo). Atraídos por la belleza de sus fondos, debida a la gran biodiversidad de especies y de comunidades marinas, buceadores de todo el mundo realizan cada año en sus aguas unas 100.000 inmersiones. En la temporada alta, en su zona submarina de túneles, cuevas y acantilados llenos de gorgonias, hasta 3000 escafandristas diarios forman rebaños que se arrastran entre organismos fragilísimos. Algunos escafandristas arrancan gorgonias, coral o lo que sea, sacrifican erizos de mar para dar comida a los peces, o aun perturban el comportamiento de unas especies no habituadas a esta frecuentación elevada. Incluso los escafandristas diligentes no siempre pueden evitar pisar el fondo, golpear con manos, codos, rodillas y aletas las paredes recubiertas de organismos sensibles, ni que las burbujas que se desprenden de sus escafandras se acumulen en el techo de las cuevas y necrosen los organismos allí incrustados. En consecuencia, las especies y comunidades más emblemáticas de los fondos de las islas (el coralígeno, los bosques de gorgonias, las cuevas, el coral rojo, las algas calcáreas, los briozoos) ofrecen claros síntomas de degradación. En las zonas más concurridas, se ha estimado que los daños producidos a la gorgonia roja, *Paramuricea clavata*, un cnidario de crecimiento muy lento, pueden eliminar a sus poblaciones en un plazo de diez años.

También, por suerte, hay efectos positivos, aunque éstos tienen una doble lectura. Desde la protección, el número de especies de peces vulnerables (las apreciadas por los pescadores), el número de individuos de sus poblaciones y el tamaño de la mayoría de las especies han aumentado. Los meros *(Epinephelus guaza)*, las lubinas *(Dicentrarchus labrax)* y las doradas *(Sparus aurata)*, entre otros, vuelven a abundar. Las especies protegidas, pues, medran.

Pero la proporción de peces gran-



6. EFECTO RESERVA. Después de algunos años de prohibición total de la pesca, las poblaciones de peces de las reservas submarinas se recuperan. Los censos indican que el número de especies de peces aumenta, que determinadas especies vulnerables (tales el mero, la lubina y los espáridos) son más abundantes, y que el tamaño medio de los peces crece asimismo. En el gráfico, uno de los resultados del estudio de la reserva de las islas Medes, en el Mediterráneo noroccidental: en comparación con una zona no protegida, la proporción de peces medianos y grandes aumenta, al tiempo que la de peces pequeños se reduce en la zona protegida.

des y medianos es excesiva con respecto a los peces pequeños: a falta de depredadores naturales, como focas, delfines o los mismos seres humanos, la población íctica de las islas Medes tiene una estructura de edades desequilibrada, propia de una población envejecida. Algunas especies de peces han sustituido al hombre en su acción depredadora: no sólo los peces grandes se comen o ahuyentan a los chicos, sino que, por ejemplo, las doradas explotan los mejillones que crecen sobre las rocas.

El hombre actúa también de manera directa sobre el mar con la pesca. El esfuerzo de pesca —parámetro que abarca número de embarcaciones y pescadores, tonelaje, combustible empleado y otros— ha aumentado exponencialmente desde principios de siglo, en tanto que el rendimiento pesquero —cantidad de pescado y marisco desembarcado anualmente— ha crecido muy poco, siendo en la actualidad del orden de los 1300 millones de toneladas para todo el Mediterráneo (aproximadamente el 2,3 % de la pesca mundial).

En buena parte ello se debe a que el Mediterráneo es un mar poco productivo, pero también al hecho de que los pueblos mediterráneos aprecian mucho los alimentos de origen marino. Hoy se pesca más que antaño, pero a costa de un esfuerzo de pesca desproporcionadamente grande.

Hay especies que han evolucionado bajo una elevada presión de depredación, y se han adaptado a la explotación. La sardina es una de ellas; el efecto del hombre es el de un depredador más, y las poblaciones se recuperan relativamente bien de una pesca intensa, aunque no de una sobrepesca excesiva. Otras especies no soportan una presión pesquera tan elevada y sus poblaciones se han ido reduciendo hasta el punto de que en la actualidad algunas de ellas son raras o sólo se encuentran en caladeros alejados. Como regla general, la explotación que se efectúa sobre especies pelágicas pequeñas, como la sardina, es más aceptada por el ecosistema marino que la que afecta a las especies pelágicas grandes (atunes, peces espada) o a las demersales y bentónicas.

Las redes de arrastre y otras artes de pesca bentónica, por no hablar de la pesca con dinamita, alteran mucho los fondos. Al igual que pasa con los campos de cultivo en tierra, el paso continuo de las redes favorece a unas especies, más resistentes y capaces de recuperar rápidamente las pérdidas (serían el equivalente de las malas hierbas), en detrimento de otras, más parsimoniosas a la hora de restablecer sus poblaciones y que sólo viven bien en ambientes estables, no perturbados (cuyo equivalente en tierra serían los árboles). El resultado es el empobrecimiento del ecosistema, el mantenimiento o la proliferación de especies banales y la desaparición de las más interesantes.

En muchos países mediterráneos los problemas se agravan por el aumento de la flota pesquera, propia o foránea. A ello hay que añadir la tendencia a capturar clases de tamaño cada vez menores, mediante la reducción de la abertura de malla de las redes. La instalación de redes de deriva, finas mallas que se extienden a lo largo de kilómetros, justo bajo la superficie del mar, destinadas a la captura de peces pelágicos, constituye un peligro para muchos animales no comercializables que quedan atrapados en ellas y mueren de hambre (tiburones, peces luna, etcétera) o ahogados (delfines, tortugas y focas, a veces también aves marinas).

Esta captura indiscriminada ahora y la eliminación expresa desde antiguo están en la base de la desaparición de la foca monje del Mediterráneo occidental septentrional y de la reducción de las poblaciones de varias especies de delfines. Los accidentes marítimos en los que un buque embiste a un gran cetáceo no son raros, y contribuyen a la reducción de las poblaciones de estos mamíferos marinos, como sin duda lo hace la contaminación del medio. Las grandes mortandades de delfines registradas hace pocos años en las costas del Mediterráneo occidental pueden atribuirse a enfermedades víricas favorecidas por un nivel de defensas orgánicas muy bajo, propiciado por el envenamiento mediante metales pesados y compuestos organoclorados. Lo mismo ocurre en peces de los niveles más altos de las redes tróficas (pez espada y túnidos).

Otras consecuencias de la explotación de especies para el consumo humano caen dentro de categorías de degradación del entorno ya comentadas. Mencionaré sólo dos: la recolección de dátiles de mar y la acuicultura en jaulas. Los dátiles de mar son moluscos que viven embutidos en las rocas calcáreas que ellos mismos perforan. En las costas italianas, su recolección se hace empleando todo tipo de herramientas, hasta martillos neumáticos, que destruyen el litoral rocoso. Así ocurre, paradójicamente, en muchas áreas protegidas.

El auge de la acuicultura está produciendo en algunos casos resultados contraproducentes sobre las comunidades litorales. Es lo que ocurre con la técnica que mantiene poblaciones de diferentes especies (doradas, lubinas, etcétera) en un medio seminatural: jaulas suspendidas en aguas litorales



7. RESULTADO DE UN LANCE DE PESCA DE ARRASTRE. Las pesquerías mediterráneas de fondo se caracterizan por un bajo rendimiento, elevada diversidad de las capturas y efecto perturbador de los artes de pesca sobre los fondos.

someras. Parte del suministro de los piensos con los que se alimenta a estos animales enjaulados, y las deyecciones de los mismos, van a parar a los fondos, que se terminan eutrofizando y degradando.

La fauna y la flora no son algo estático e inmutable, sino dinámico, sujeto a cambios naturales, aunque de ritmo muy lento. El poblamiento vegetal y animal del Mediterráneo se ha hecho a retazos: en gran parte es atlántico y boreal, pero también tropical, y existe un número muy reducido de endemismos. Siempre han existido recolonizaciones después de extinciones generales, como las de especies que procedentes del Atlántico llegaron por Gibraltar después de las diferentes fases de desecación del mar, y siempre ha habido invasiones naturales de especies extramediterráneas.

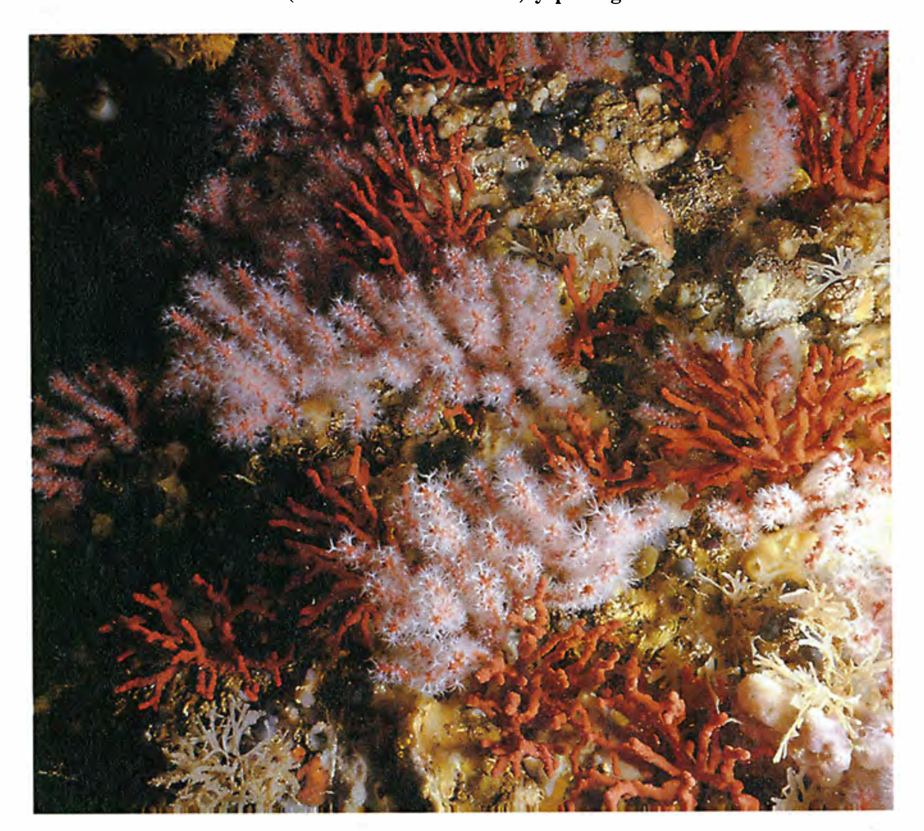
Sin embargo, determinadas actividades humanas están cambiando, a un ritmo que es superior al natural, la tasa de entrada de especies exóticas en el Mediterráneo. Estas "invasiones" suponen la eliminación por competencia de algunas especies autóctonas y la modificación drástica de las comunidades marinas. Las especies de un determinado ecosistema se reparten las funciones ecológicas, y raramente dos de ellas desempeñan el mismo papel: la más eficiente acaba suplantando a la que lo es menos.

Primero llegaron los organismos del *fouling*, término inglés que se refiere a las algas y animales que, adheridos a los cascos de los barcos, son transportados por el hombre y se encuentran distribuidos por todos los mares. En segundo lugar, aquellas especies que, asociadas como epibiontes o comensales a especies que el hombre cultiva, se establecen en ambientes de los que diversas barreras biogeográficas las habían excluido, barreras que el hombre ha salvado al introducirlas como cultivo, como es el caso de la ostra atlántica o del langostino japonés en el Mediterráneo.

El alga *Sargassum muticum*, que llegó en cajas de ostras japonesas y que ha adquirido un desarrollo espectacular en algunas lagunas litorales, interfiere con actividades pesqueras y de acuicultura. Son varias las especies asociadas a mejillones, ostras y demás que se han ido extendiendo a medida que el hombre introducía estas especies cultivadas en ambientes nuevos. También las propias especies cultivadas han experimentado crecimientos espectaculares como consecuencia de fugas accidentales de sus áreas de cultivo; ostras, langostas, nécoras, pero también es-



8. PRADERA DE *POSIDONIA OCEANICA*. Esta fanerógama (planta superior, con raíces, tallo y hojas, así como con flores, frutos y semillas) es endémica del Mediterráneo, donde forma densos prados submarinos, en aguas relativamente someras y cercanas a la costa y sobre fondos arenosos. La pradera de *Posidonia* es un ecosistema valiosísimo desde el punto de vista ecológico: su producción de materia orgánica es elevada, aunque en gran parte es exportada y sólo en pequeña fracción es consumida *in situ*; ofrece refugio a numerosas especies de peces y otros animales móviles, así como soporte a plantas y animales que viven fijos a un sustrato; todo ello le confiere una elevada diversidad en comparación con los fondos desnudos circundantes. La pradera suministra oxígeno al medio, capta partículas en suspensión en el agua, estabiliza los sedimentos (mediante sus rizomas) y protege con ello el litoral.



9. CORAL ROJO. *Corallium rubrum*. Este gorgonario de esqueleto duro y de delicados pólipos blanquecinos (abiertos en algunas de las colonias de la ilustración) es muy apreciado en joyería, razón por la cual las colonias de este celentéreo han sido explotadas desde antiguo; cuando la escafandra autónoma hizo accesibles los lugares oscuros (cuevas o fondos profundos) en los que vive, la especie desapareció de muchos puntos del litoral mediterráneo occidental en los que era común. Dado el lento ritmo de crecimiento (una colonia de coral rojo de 20 cm puede contar con 40 años de edad), la recuperación de la especie es difícil.

pecies sin valor comercial e incluso perjudiciales, como el cangrejo americano, de estuarios, han protagonizado proliferaciones episódicas.

Un tercer tipo de invasión es la denominada migración lessepsiana: la entrada, a través del canal de Suez, de muchas especies animales y algunas vegetales procedentes del mar Rojo y del océano Indico. Al ser las especies mediterráneas competidoras menos eficientes que las invasoras, éstas las suplantan. Algunas de las especies recién llegadas están convirtiéndose en plaga: no sólo sustituyen a las autóctonas, sino que se multiplican más rápidamente que éstas y el efecto de su depredación sobre el entorno es mucho mayor. El seguimiento que se hace del avance de algunas de estas especies demuestra que la velocidad es de varias decenas de kilómetros por año: la fanerógama marina *Halophila stipulacea* y el pez *Siganus rivulatus*, entre otras, se encuentran ya a medio camino del Mediterráneo, en el canal de Sicilia.

Algunas de estas invasiones tienen un origen singular. Es el caso del alga *Caulerpa taxifolia*, introducida accidentalmente en el Mediterráneo procedente del Acuario de Mónaco. Se trata de una especie tropical con una enorme capacidad para ocupar todo tipo de fondos, sedimentarios o rocosos, y ello mediante poblamientos muy densos que recubren y ahogan a las algas autóctonas e incluso a las fanerógamas. El tamaño que alcanza la planta es mayor que el que tiene en su área de origen y también ocupa el espacio con mayor rapidez. Desde su primer avistamiento hace diez años, *C. taxifolia* ha aumentado el espacio ocupado en el litoral francés y ha llegado al italiano y al español (Baleares). Allí donde se han ensayado, los esfuerzos de erradicación han tenido poco éxito.

Los casos de *S. muticum* y *C. taxifolia* suponen no sólo sustitución de especies mediterráneas por otras alóctonas, sino modificación de las comunidades marinas o lagunares en las que se instalan. Muchas lagunas costeras están sufriendo modificaciones espectaculares de la biota y las comunidades biológicas. Quizá la mejor estudiada sea el Mar Menor, en la costa española. En los últimos veinte años, y debido a un intercambio hídrico mayor con el Mediterráneo inmediato, el Mar Menor está dejando de ser la laguna hipersalina que fue antaño y se está convirtiendo en una bahía del Mediterráneo. Sus poblamientos biológicos son cada vez más semejantes a los característicos de este mar.

No es difícil pronosticar una pérdida de identidad similar para el Mediterráneo si el hombre facilita la migración lessepsiana por levante, la introducción de especies exóticas por poniente y la proliferación por todas partes de especies banales, resistentes a la contaminación y a la explotación humana.

10. INVASION VERDE. El alga *Caulerpa taxifolia*, una especie tropical recién llegada al Mediterráneo, se ha adaptado muy bien y se expande a un ritmo vertiginoso. Medra sobre todo tipo de sustratos y es mejor competidora que las especies de algas autóctonas y que las fanerógamas, como *Posidonia oceanica*, a las que recubre y sustituye. La presencia de sustancias tóxicas en todas las especies de *Caulerpa* impide que los herbívoros la mantengan a raya. Los prados de *C. taxifolia*, a pesar de su aspecto lozano, son verdaderos desiertos para la fauna de invertebrados y peces.

¿Desaparece, pues, el Mediterráneo como tal? ¿Se muere? Para un ciudadano que viva en el arco noroccidental que va desde Cartagena a Génova, pasando por Barcelona y Marsella, entre otras grandes ciudades y conurbaciones, arco que se ha estimado que vierte al mar, por kilómetro de costa y año, 336 toneladas de desechos de origen urbano, que sufre los efectos de la contaminación de las industrias instaladas sobre el litoral o distribuidas por la red fluvial que arrastra los vertidos al mar, que es testigo de cómo la población ribereña se multiplica en verano, la frase "el Mediterráneo se muere" no hace más que confirmar lo que ya experimenta de forma cotidiana.

Pero el Mediterráneo es mucho más que este arco costero. Cuando se buscan datos objetivos y el diagnóstico se refiere a todo el mar, la afirmación anterior se convierte en un clisé propagandístico que conviene desmentir. A pesar de ser un mar pequeño, el Mediterráneo puede asimilar la mayoría de los productos extraños que se vierten en él. Algunos de tales productos son fertilizantes que permiten aumentar un poco la baja producción primaria. Otros desaparecen rápidamente de las aguas y quedan retenidos en el sedimento.

A través de Gibraltar, arrastrados por la lengua de agua mediterránea densa que resbala hacia el océano por debajo del agua atlántica, más ligera, que penetra continuamente en el Mediterráneo, se escapan fósforo y otros nutrientes en que es deficitario, pero también sal y buena parte de los contaminantes.

Algunos datos pueden ser escandalosos a primer golpe de vista, pero si se ponen en su contexto pierden virulencia. Por ejemplo, se ha calculado que en el Mediterráneo entran anualmente 100 toneladas de mercurio procedentes de contaminación antropogénica, pero otras 500 toneladas anuales son de origen natural. Estas han "contaminado" siempre el mar, como el azufre liberado por los volcanes y no sólo por las chimeneas industriales, la materia orgánica que los ríos arrastran normalmente o los sedimentos que las inundaciones y avenidas aportan también al litoral.

Por otra parte, algunos indicadores señalan que las medidas de prevención y saneamiento emprendidas por los gobiernos ribereños con motivo de la aplicación del Plan de Acción del Mediterráneo (adoptado en Barcelona en 1975) y del Plan Azul (emprendido en 1979 y recientemente finalizado) comienzan a notarse.



11. EXPANSION IMPARABLE. La apertura del canal de Suez, hace 125 años, propició la entrada oriental de migrantes procedentes del mar Rojo y del océano Indico. El aumento del tráfico marítimo, la acuicultura y otras introducciones intencionadas favorecieron la colonización y posterior establecimiento de especies procedentes de todos los mares. En la ilustración se indica el progreso comprobado (mediante algunas de las fechas de observación) para dos de tales especies, un migrante lessepsiano (*Siganus rivulatus*, un pez) y un alga tropical introducida desde acuarios (*Caulerpa taxifolia*).

El número de playas consideradas no aptas para el baño ha pasado del 33 % en 1976 al 20 % en 1990; los vertidos industriales de algunos ríos se han reducido mucho: un 44 % en el Ródano en los últimos años. Para cumplir las directivas comunitarias que prevén que para el año 2000 todos los vertidos fluviales deberán depurarse, muchos gobiernos están construyendo plantas depuradoras, lo que empieza a reducir la cantidad de residuos que llegan al mar. En una decena de puertos se están construyendo asimismo, o están ya en funcionamiento, instalaciones para el deslastrado de los petroleros.

Las estimas recientes sobre los niveles totales de determinados contaminantes dan cifras más bajas que en ocasiones anteriores; en algunos casos ello se debe a que los aportes de tales contaminantes han cesado (caso del DDT); en otros, a que las estimas previas se basaban en pocos datos, lo que había sesgado el monto total (caso de los hidrocarburos en general). Otros datos no son tan alentadores: estudios en áreas muy alejadas de la costa indican que, en mar abierto y en los grandes fondos, la mayor parte de los contaminantes (el 90 % de los metales pesados y del 20 al 60 % de los nutrientes) llegan al Mediterráneo por vía atmosférica.

La pesca de determinadas especies se está racionalizando; se están instalando "arrecifes" disuasorios, estructuras en las que las redes de arrastre se enganchan. Muchas especies de animales y plantas están protegidas por ley, y ciertas comunidades de gran interés ecológico, como la pradera de *P. oceanica*, son objeto de protección y seguimiento. Los programas internacionales de inspección y prevención de la contaminación movilizan cada vez más presupuestos y personal.

Todas estas medidas han conseguido algunos resultados: los niveles de contaminación se mantienen similares a los de hace veinte años, lo cual es notable si se tiene en cuenta el crecimiento demográfico, turístico, agrícola e industrial de este último cuarto de siglo. El número de áreas protegidas en todo el Mediterráneo va en aumento.

A todos estos indicadores debe añadirse el más importante: el Mediterráneo es mucho más que únicamente su litoral. Cuando se consideran los grandes fondos y las aguas de alta mar, la huella del hombre es mucho menos evidente y las comunidades biológicas, por no citar la dinámica del propio mar, mucho menos afectadas. El Mediterráneo no se muere. Podríamos decir que está enfermo, pero que esta enfermedad no es terminal. Si se mantiene la tendencia de solucionar los problemas que lo aquejan, y si se llegan a tratar las causas últimas de su degradación, y no sólo los síntomas, podremos seguir teniendo un enfermo crónico al que habrá que medicar siempre, pero que no tiene por qué empeorar.

Difícilmente se volverá al mar cristalino y paradisíaco que antaño fue el Mediterráneo (como difícilmente se volverá en el continente europeo a tener las comunidades naturales —bosques, praderas, humedales, etc.— de hace mil o más años). Pero una actuación seria de los países ribereños sobre aquellos aspectos más graves que inciden sobre la salud del Mediterráneo (la pérdida de la biodiversidad y la ocupación del litoral, amén de la generación de sustancias contaminantes) puede producir una convalecencia aceptable, compatible con los usos tradicionales y que preserve su belleza, su biota y sus comunidades naturales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EFFECTS OF TOTAL FISHING PROHIBITION ON THE ROCKY FISH ASSEMBLAGES OF MEDES ISLANDS MARINE RESERVE (NW MEDITERRANEAN). A. García y M. Zabala, en *Scientia marina*, volumen 54, número 4, páginas 317-328, 1990.

CONSERVATION DES ECOSYSTÈMES MÉDITERRANÉENS. Dirigido por F. Ramade. Economica. París, 1990.

SEASONAL DISTRIBUTION PATTERNS OF POLYCHAETES FROM A HEAVILY POLLUTED COASTAL AREA (BARCELONA, NE SPAIN, NW MEDITERRANEAN). J. D. Ros y M. J. Cardell, en *Marine Eutrophication and Population Dynamics*, págs. 101-110. Olsen & Olsen, Fredensborg, 1992.

Ciencia y empresa

Parvovirus y cáncer

Oncosupresión

El conjunto de enfermedades que agrupamos bajo el nombre de cáncer posee una etiología común y evoluciona con arreglo a patrones definidos. A partir de un número discreto de alteraciones genéticas que afectan a genes reguladores de la proliferación celular, se desencadenan cambios genéticos y fenotípicos más profundos que confieren a las células la capacidad de producir metástasis y de escapar al control del sistema inmunitario.

La quimioterapia y radioterapia actúan contra esa propagación desenfrenada, la llamada hiperplasia tumoral. Si bien la prognosis para tales patologías ha mejorado en los últimos años, estos tratamientos no excluyen de su acción agresiva a las células fisiológicas proliferativas (las generadoras de los sistemas linfático y sanguíneo o las células epiteliales), que se ven por tanto afectadas.

La terapeútica antitumoral requiere drogas y métodos específicos que, siendo selectivos en su mecanismo de acción, permitan aumentar las dosis sin dañar el resto del organismo.

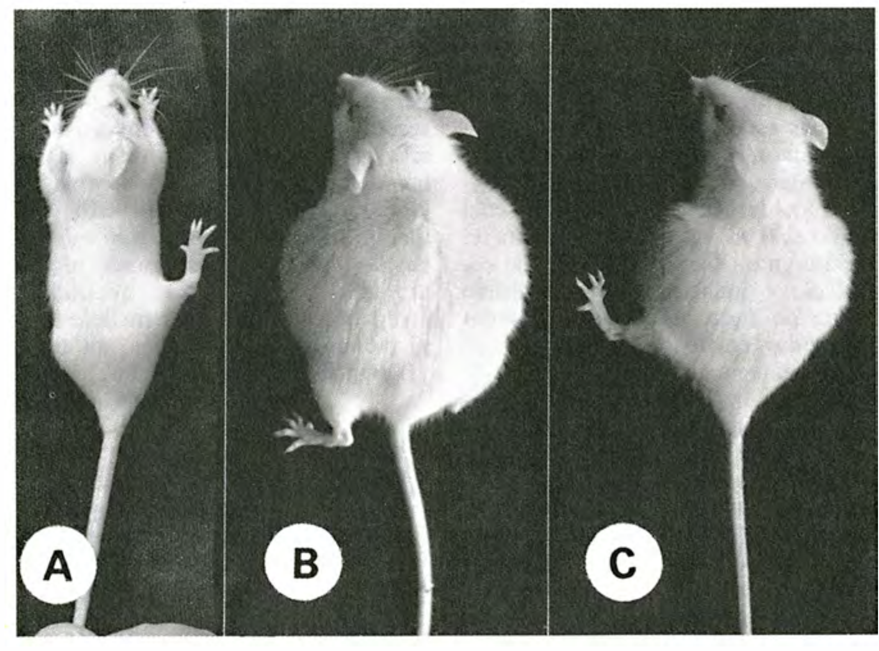
La familia Parvoviridae engloba a virus de pequeño tamaño, que poseen un genoma de ADN de cadena sencilla y tienen una estructura icosaédrica muy estable. Son virus de fácil difusión en la naturaleza. Infectan a muy diversas especies de vertebrados superiores y al hombre, si bien sólo producen patologías en huéspedes en proceso de desarrollo o inmunocomprometidos.

La mayoría de los parvovirus se aislaron a partir de tumores, líneas celulares tumorales, preparados de otros virus oncogénicos y, también, de animales de experimentación sometidos a tratamientos carcinogénicos. Esta estrecha asociación de parvovirus con cáncer hizo pensar que los parvo podrían contarse entre los virus cancerígenos. Sin embargo, los experimentos diseñados para confirmar tal hipótesis avalaban la idea contraria: los parvovirus parecían capacitados para suprimir tumores en sus huéspedes. Se piensa ahora que el desarrollo de los tumores activa o extiende infecciones de parvovirus, lo que resulta en una asociación oportunista —y no causal— de estos virus con el cáncer.

La interacción entre parvovirus y cáncer hay que entenderla en el contexto de los requisitos que tales virus poseen para su multiplicación. Los parvovirus, de una estructura genética muy simple, han de penetrar en el núcleo de las células que infectan para utilizar las maquinarias de transcripción y replicación celulares en su propio provecho. Puesto que la síntesis de ADN y la división de las células se realiza con arreglo a un programa regulado por el ciclo celular, los parvo sólo podrán multiplicarse en tejidos proliferativos; en principio, la hiperplasia les es ventajosa.

Los parvovirus no infectan cualquier especie o tipo celular. Son muy selectivos. Esa limitación parece estar determinada por receptores y factores intracelulares relacionados con la diferenciación celular en un tejido y con la especie animal. Así, la infección productiva de un parvovirus se ciñe a ciertos tejidos proliferativos del huésped, y, en condiciones naturales, los parvo de roedores, por ejemplo, no son patogénicos para humanos. En numerosas ocasiones, sin embargo, los cambios genéticos y fenotípicos que se desencadenan en la transformación celular levantan las barreras que delimitan el tropismo de estos virus y permiten que parvovirus de ratón puedan multiplicarse en células neoplásicas humanas. En esta permisividad al virus, inducida en el proceso de transformación tumoral, podría residir la clave de la oncosupresión producida por parvovirus.

Se ha comprobado que inhiben la oncogénesis espontánea: roedores infectados con parvovirus han mostrado una incidencia de tumores que era veinte o venticinco veces inferior a la del grupo control. Se están realizando estudios epidemiológicos en la población humana para establecer



Supresión del crecimiento de tumor ascítico de Ehrlich (EA) en ratones ICR. A: ratón inoculado con 2 x 10^5 células EA por inyección intraperitoneal, y con 4 x 10^5 partículas infecciosas de virus MVMp por inyección intramuscular. B: ratón inoculado solamente con 2 x 10^5 células EA. C: ratón inoculado como en A, pero con virus al que se ha disminuido la infectividad 2500 veces por irradiación con ultravioleta. Los tumores se desarrollaron a los 5-7 días postinoculación, y los animales de los grupos B y C murieron a las 2-3 semanas. (Reproducido con permiso de E. Guetta, Y. Graziani y J. Tal J., en J. Natl. Cancer Inst. *vol. 76, página 1177; 1986)*

la posible relación entre infección latente del parvovirus humano AAV (siglas de la expresión inglesa que designa el virus asociado a adenovirus) e incidencia de cáncer. Hasta el momento, parece al menos que poblaciones control sanas muestran títulos de suero contra AAV-5 tres veces mayores que los observados en pacientes con cáncer cervical; para otros tumores, los datos serológicos no son tan claros.

Pero el efecto oncosupresor se demuestra inequívocamente en experimentos en los que la infección con parvovirus suprime la inducción provocada de tumores en sus huéspedes. Así, la inoculación con parvovirus de roedores recién nacidos les protege contra la formación de tumores por tratamientos carcinogénicos simultáneos o subsecuentes. Los parvovirus bloquean incluso el desarrollo de tumores establecidos, según se ha comprobado a propósito de tumores transplantados en perros y roedores cuando los animales son inoculados con parvovirus.

La oncosupresión funciona para tumores de distinto origen (leucemia, sarcoma, carcinoma) y es también independiente del agente transformante (virus tumorales ADN y ARN, carcinógenos químicos o radiación). Pero su oposición a la oncogénesis no acaba siempre en éxito. La dosis de virus, vía de inoculación, tamaño del tumor y tiempo de tratamiento, entre otros factores, determinarán la suerte final del fenómeno. De ahí que se haya descrito el fracaso en el tratamiento con parvovirus H-1 de dos jóvenes que padecían un osteosarcoma avanzado.

Aunque desconocemos los mecanismos de la oncosupresión *in vivo*, diríase que los tumores constituyen un medio favorable para la multiplicación de estos virus, lo que comportaría su inhibición y eliminación. Para abordar esta cuestión en un contexto menos complejo que un organismo superior, se han estudiado *in vitro* los aspectos moleculares que rigen la interacción directa entre parvovirus y células normales transformadas en malignas. Se ha observado que, en general, el desarrollo de un fenotipo transformado, y no solamente la inmortalización, es necesario para sensibilizar las células a la acción de los parvovirus.

No todos los oncogenes inducen el fenotipo adecuado; sólo un número discreto de ellos producen los cambios metabólicos necesarios que llevan a esta sensibilización, donde los genes denominados supresores de tumores también parecen cooperar. En las células tumorales sensibles, se ha intensificado la expresión génica desde el promotor temprano del virus, lo que resulta en un aumento relativo en la acumulación de intermedios replicativos de ADN y proteínas víricas. Son las proteínas no estructurales del virus las que tienen una actividad citotóxica más evidente, inhibiendo la síntesis de ADN celular y la expresión desde promotores diversos.

A su vez, las células transformadas demuestran una mayor sensibilidad a niveles comparables de estos productos tóxicos del virus, constituyendo otro factor de especificidad antitumoral en los mecanismos que operan en la oncosupresión. Sin embargo, no siempre la interacción de la célula tumoral con el virus comporta la muerte y destrucción de ésta; en ocasiones, el virus es capaz de reconducir el programa de expresión génica hacia mayor diferenciación manteniendo la viabilidad celular.

Desgraciadamente estas pruebas no se han corroborado *in vivo*, y cuando se analizan tumores de animales previamente infectados, o son inoculados posteriormente con parvo *in vitro*, no se encuentra una replicación del virus proporcional a su efecto supresor. Por tanto, la mayor susceptibilidad de las células malignas a los parvovirus parece ser un componente de la oncosupresión, pero no da cuenta de toda la complejidad del fenómeno.

La actividad antineoplásica de los parvovirus encierra un evidente interés oncológico, pues podrían utilizarse como reactivos biológicos, selectivos y eficaces al menos contra algunos cánceres humanos. Pero a la vez abre grandes retos de investigación básica, ya que, para entender la oncosupresión, y en su caso potenciarla o dirigirla, hemos de conocer los cambios metabólicos —y no solamente los genéticos— que operan en las células en diferentes estadios de transformación, y su interrelación con el organismo. La investigación se propone dar respuesta a cuestiones importantes: evaluar la inocuidad absoluta de estos virus, comprobar su no interferencia con el sistema inmune, producir grandes cantidades de virus que permitan el tratamiento de tumores avanzados y ensayar la oncosupresión en modelos transgénicos de tumores. Por ahora, el empleo de los parvovirus como antitumorales en clínica es todavía sólo una inquietante esperanza.

JOSÉ M. ALMENDRAL
Centro de Biología Molecular "Severo Ochoa",
Universidad Autónoma de Madrid.

Convertidores de potencia

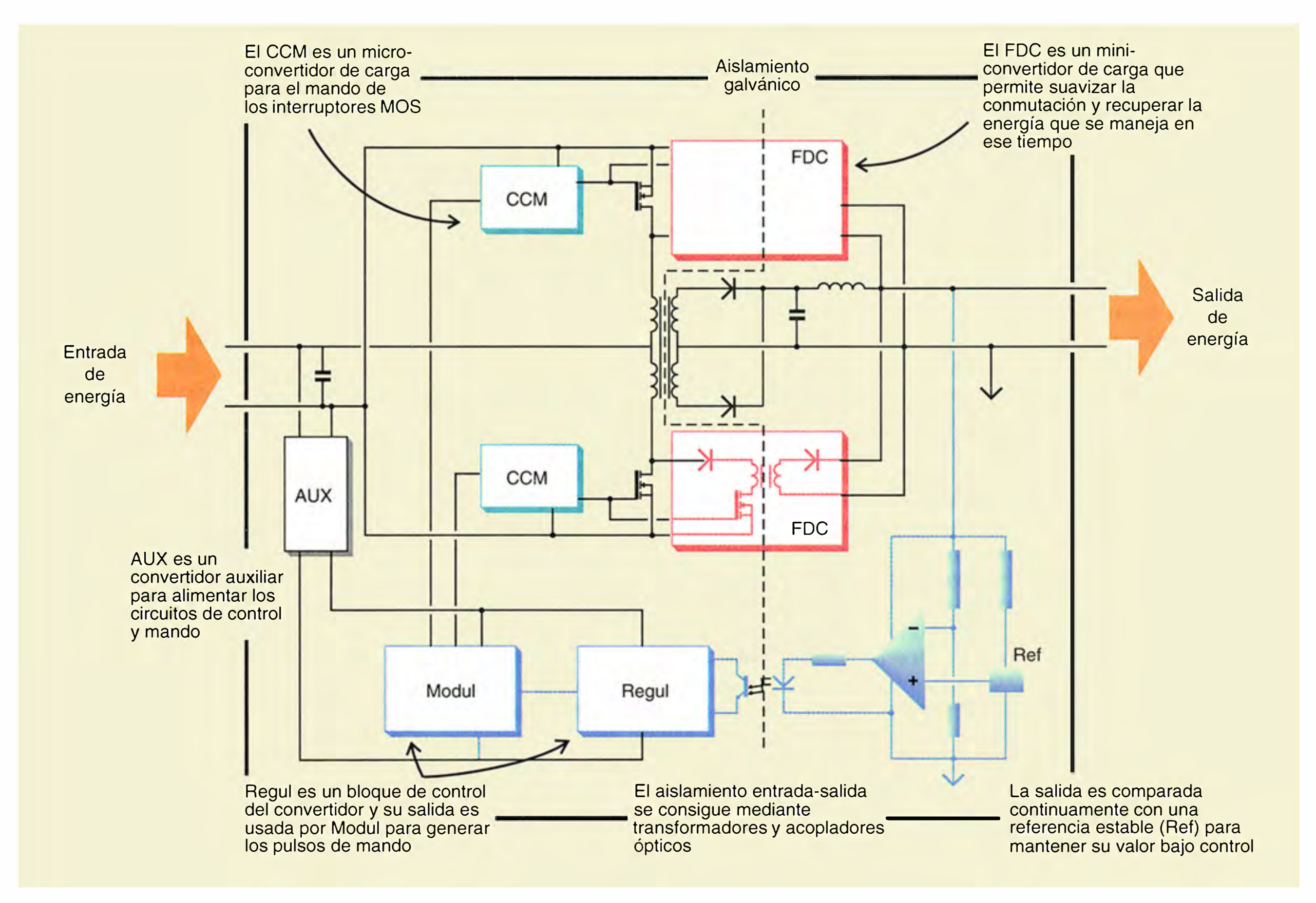
Carga y descarga de reactancias

La energía consumida por la Comunidad Europea durante 1992 fue de 1839 terawatts hora. Buena parte de la misma se controló mediante algún dispositivo electrónico semiconductor. Sea con finalidades domésticas o industriales, estos pequeños elementos de silicio dejan pasar miles de ampères a su través o soportan miles de volts sin ningún problema. Su aparición y su masiva comercialización permiten un uso más eficiente de la energía eléctrica y posibilitan la construcción de equipos electrónicos de potencia de mayor rendimiento, menor volumen, menor peso y, sobre todo, muy bajo coste.

Muchas veces, absortos por el refinamiento del soporte físico ("hardware") y la elaborada programación ("software") de cualquier microcomputador potente y barato, se nos escapa la importancia que reviste otro elemento: la fuente de alimentación, la parte que proporciona la energía en condiciones adecuadas para que todo funcione. Del correcto trabajo de la fuente depende, en efecto, el sistema entero. Y también ella ha seguido el camino de la miniaturización experimentado por los componentes del ordenador.

Desde el modesto sistema de potencia del ordenador personal hasta los que mueven las locomotoras o los motores en las plantas industriales, hay todo un abanico de equipos electrónicos de potencia, unidos por un mismo criterio común: hacer máximo el rendimiento energético (cociente entre la potencia entregada y la que toma de la entrada); con esta condición se encargarán de convertir las magnitudes eléctricas (corriente, tensión, frecuencia, forma de onda, etcétera) de entrada adaptando sus valores a las necesidades del consumidor en cada momento. Los equipos en cuestión responden a la denominación general de convertidores electrónicos de potencia.

Según las corrientes de entrada y salida sean alternas (CA) o continuas (CC), tendremos convertidores CA/CC, CC/CA, CA/CA y CC/CC. La práctica totalidad de ellos trabajan en conmutación. Sus componentes electrónicos de potencia (diodos, tiristores, transistores bipolares, transistores de efecto de campo con puerta aislada, MOSFET, y transistor bipolar de puerta aislada, IGBT) cambian



Esquema completo de un convertidor de corriente continua. Se señala en negro la estructura principal de potencia que realiza la conversión energética. Los bloques en rojo (FDC) y en azul claro (CCM) son convertidores de potencia para incrementar el rendimiento. Abajo, el sistema de supervisión de la salida y de regulación

entre dos estados, el de corte y el de saturación. En el estado de corte, los convertidores soportan la tensión sin dejar pasar corriente; en el estado de saturación conducen corriente sin soportar tensión.

En razón, pues, de su funcionamiento los convertidores pueden asimilarse al de un interruptor electromecánico o mecánico, con la salvedad de que pueden conmutar a frecuencias elevadas, que van desde unos pocos miles de veces por segundo —en el caso de tiristores— hasta varios millones, en el caso de los transistores MOS, que constituyen el interruptor electrónico de potencia más rápido.

Idealmente hablando, en el trabajo en conmutación la disipación de potencia en el propio dispositivo conmutador es nula; siempre es cero alguna de las magnitudes que intervienen en la conmutación y se puede, por tanto, controlar la corriente eléctrica sin gasto energético. Pero los componentes no son del todo ideales y sí se producen pérdidas de potencia tanto en saturación (no es nula la tensión), como en corte (no es nula la corriente), y, sobre todo, durante los instantes de cambio de una a otra situación (conmutación).

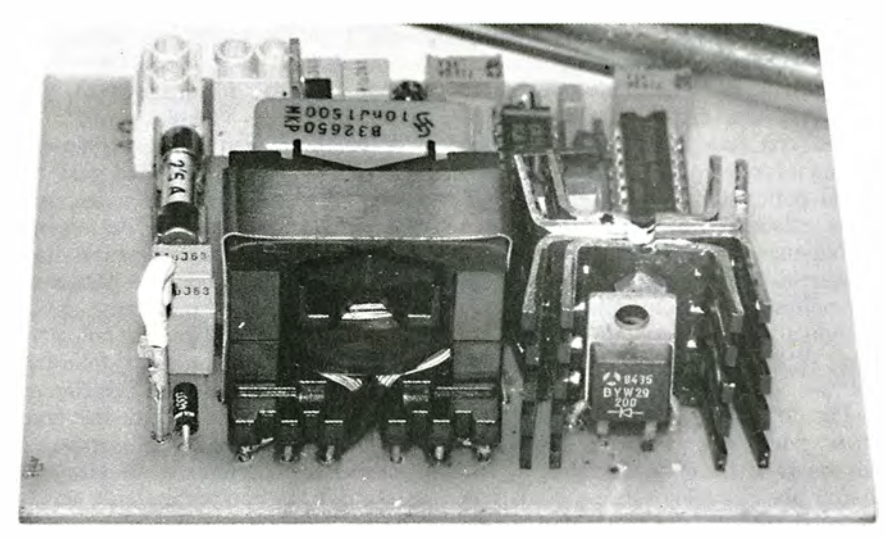
Pese a las condiciones que alejan de la situación ideal, los convertidores conmutados presentan el mejor de los rendimientos posibles. Pero, ¿cómo funcionan realmente? En esencia, los interruptores dejan pasar corriente eléctrica permitiendo que esa energía se almacene en elementos reactivos (bobinas y condensadores) o se extraiga de los mismos; a la operación de almacenamiento se la llama carga y, descarga, la de extracción. La energía se guarda transitoriamente en los campos magnéticos confinados en los núcleos de las bobinas y en los campos electrostáticos confinados en el interior de los condensadores.

Según cuánto tiempo se emplee en la carga y cuánto dure la descarga se tendrán diferentes relaciones entre los valores de tensiones y corrientes en la entrada y en la salida. Las expresiones de tales relaciones de transformación dependen de la topología del convertidor; pueden ser muy simples o alcanzar gran complejidad.

La electrónica de potencia trabaja intensamente en la mejora de todos los aspectos que forman parte del proceso de conversión. Los avances más espectaculares han tenido lugar en el campo de los convertidores de potencias bajas, de menos de un kilowatt, y que conmutan en torno a 1 megahertz. En este tipo de sistemas, el máximo esfuerzo se vuelca en la reducción de tamaño y peso, lo que se logra incrementando la frecuencia de conmutación. ¿Por qué?

Nos haremos una idea, siquiera provisional, atendiendo a lo que ocurre en la carga y descarga de las reactancias. Cuanto menos tiempo tenga que permanecer almacenada la energía en ellas, menor será su "tamaño"; puesto que éstos son los elementos más voluminosos de todo convertidor, reducir su tamaño resulta decisivo, no sólo para los que alimentan los sistemas informáticos, sino también para los que abastecen centrales telefónicas digitales e incluso los equipos instalados a bordo de los ingenios aeroespaciales, donde el volumen y el peso constituyen factores a tener en cuenta.

No se puede, sin embargo, elevar



La miniaturización es el principal objetivo de los convertidores electrónicos de potencia en la gama de potencias menores de 1000 watts. La fotografía corresponde a un prototipo de convertidor CC/CC desarrollado en la Universidad de Oviedo en 1990, de más de 80 watt que trabaja a 1,2 megahertz y que ocupa un tamaño mínimo

indefinidamente la frecuencia de trabajo de un convertidor conmutado. Existen barreras difíciles de franquear todavía, como las impuestas por los materiales. Todos los elementos que componen los sistemas de potencia tienen un comportamiento que empeora con la frecuencia de trabajo, con el aumento consiguiente de pérdidas de potencia en la conmutación; para resolver este problema se han establecido dos líneas de investigación: mejorar los dispositivos y materiales extendiendo su rango útil de aplicación y crear nuevas topologías que permitan un mejor trabajo.

La primera de las líneas está facilitando la aparición de nuevas generaciones de dispositivos de conmutación con un comportamiento optimizado y la síntesis de nuevos materiales para los núcleos magnéticos y los dieléctricos de los condensadores. Actualmente, en bobinas y transformadores se emplean ferritas de NiZn para trabajar por encima del megahertz, pero las investigaciones avanzan hacia los materiales amorfos que, en un futuro no muy lejano, permitirán aumentar el rango de aplicación.

Paralelamente, se han ido creando nuevas configuraciones o topologías que reducen las pérdidas —o incrementan el rendimiento total— u obtienen el máximo aprovechamiento de las capacidades de cada dispositivo, mediante la integración incluso de sus elementos parásitos, a los que se les da utilidad en el esquema final, a la vez que se palian los problemas de ellos derivados. El resultado es un equipo con pocos componentes, donde la mayoría de ellos trabajan mejor.

Esta segunda vía de investigación se ha visto reforzada, desde los años ochenta, con la aparición de convertidores resonantes, caracterizados por sus formas de onda cuasi-senoidales. Pero tales topologías, consideradas en un principio la solución, fueron pronto superadas en los noventa por las técnicas de conmutación suave. Recurren éstas a pequeñas redes, que evitan brusquedades en las conmutaciones y son válidas para cualquier topología. Suelen estar constituidas por microconvertidores de carga que llevan la energía desde los componentes de suavización hasta otro punto del circuito.

Así, desde una idea relativamente simple, los convertidores electrónicos de potencia resultan ser sistemas muy complejos en su concepción y diseño, pues requieren, en ocasiones, el uso de programas de cálculo refinadísimos. Gracias a esta avanzada elaboración, se consiguen los fines que se perseguían: la reducción de tamaño, peso y coste, el aumento de rendimiento y prestaciones. Además, posibilita que, en cualquier parte donde se necesite una correcta alimentación, sea computador, avión, satélite o nave espacial, se incluya el convertidor de potencia y pase inadvertido, en un segundo plano, ocupando un mínimo espacio y dejando el protagonismo en manos de los equipos digitales. Pero estará ahí, garantizando que todos los equipos reciben el necesario suministro energético.

MIGUEL ANGEL PÉREZ GARCÍA
Departamento de ingeniería eléctrica,
Universidad de Oviedo

Espectroscopía

Inductancias

Llámanse espectroscópicos los métodos de investigación que examinan la respuesta del material de interés a un estímulo cíclico con diferentes frecuencias. Abordaremos aquí un método de reciente desarrollo, el que estudia el comportamiento de la impedancia inductiva frente a la frecuencia del campo magnético de excitación.

Conviene de entrada aclarar algunas nociones. El intervalo de frecuencias en el que aparecen los fenómenos abarca desde unos hertz hasta algunas decenas de megahertz. Podemos definir la impedancia como una función de transferencia que modifica la amplitud y la fase de la señal alterna. Los formalismos complejos permiten establecer estos cambios considerando que la impedancia es una variable compleja, Z^*, que está formada por una parte real, Z', y una parte compleja, Z'': $Z^* = Z' + jZ''$, siendo j la base de los números imaginarios, $(-1)^{1/2}$.

Las medidas de propiedades eléctricas y magnéticas de materiales a diferentes frecuencias no es reciente; el comportamiento de los materiales con la frecuencia del campo de excitación es crucial para muchas de sus aplicaciones. Este comportamiento puede utilizarse igualmente en la investigación fundamental de los procesos de polarización; pensemos, por ejemplo, en la polarización iónica (desplazamiento de los cationes con respecto a los aniones en un cristal iónico), interfacial (acumulación de cargas en interfaces por las que no pueden atravesar), de orientación (cambio en la orientación de una molécula que posee un momento dipolar intrínseco), etcétera.

La disponibilidad de equipos analizadores de impedancia controlados por ordenadores personales, capaces de realizar medidas a 100 frecuencias diferentes en unos cuantos minutos en un intervalo amplio de frecuencias, su almacenamiento en diskette y su análisis en el mismo ordenador por todos los formalismos complejos (impedancia, admitancia, permisividad, permeabilidad) ha permitido un desarrollo rápido de estas técnicas de análisis e investigación.

La base de estas medidas a muchas frecuencias estriba en los diversos mecanismos de polarización del material. Pueden éstos ser separados (o "resueltos"), ya que cada uno de ellos posee un comportamiento diferente. En las bajas frecuencias, todos los mecanismos están activos; pero

conforme va aumentando la frecuencia, los mecanismos más lentos se van eliminando ("dispersando"), subsistiendo en las altas frecuencias solamente los mecanismos más rápidos, capaces de seguir al campo.

Desde hace más de veinte años se viene aplicando el método de espectroscopía de impedancias al estudio de las propiedades eléctricas. Una breve revisión del tema puede ser ilustrativa. En general, se utiliza una muestra en forma de disco, a la que se le adhieren electrodos metálicos (oro, plata). Los resultados de las medidas de impedancia a un gran número de frecuencias se descompone en sus partes real e imaginaria. La gráfica del plano de la impedancia compleja se nos ofrece muy reveladora, ya que la distribución geométrica de los puntos (uno para cada frecuencia) permite inferir el circuito equivalente capaz de representar los resultados experimentales. Este es un circuito eléctrico abstracto, formado por elementos ideales (resistencias, condensadores, inductores), en una disposición tal que generen una impedancia similar a la del material real. En el caso de la conductividad eléctrica, un semicírculo en el plano Z* es característico de una disposición en paralelo; en cambio, una recta con pendiente cercana a la vertical está asociada con una disposición en serie.

Por último, el análisis puede conducir a la asociación de los elementos del circuito equivalente con las características estructurales del material. Así, una disposición RC en paralelo con una capacidad del orden de nanofarads observada en un material policristalino (formado por muchos cristalitos pequeños, del orden de algunas micras), representa la impedancia de las fronteras entre los cristalitos. Esta impedancia es más resistiva que los cristalitos, pues se trata de una región de desorden cristalino.

Por contra, una recta con alta pendiente que aparece en la región de las bajas frecuencias (entre 1 y 100 hertz, por ejemplo) está asociada con la presencia de conductividad iónica en la muestra en cuestión. En otras palabras, una vez identificada la correlación estructura-elemento del circuito equivalente, se puede estudiar cada uno de ellos separadamente, así como los efectos de todas las variables (temperatura, composición, impurezas, etc.), que se quiera imaginar.

El gran potencial de estos métodos reside en su capacidad para investigar aspectos microscópicos de los materiales, a partir de medidas macroscópicas simples, rápidas y no destructivas.

Estos métodos espectroscópicos se han generalizado al caso de las propiedades magnéticas. Por centrarse en la inductancia se denomina espectroscopía de inductancias. Se ha tomado por modelo el comportamiento típico de un material ferromagnético, una cinta amorfa de VitrovacR 6025.

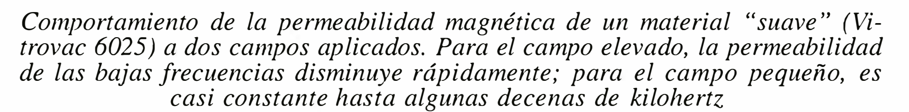
A bajas frecuencias, el comportamiento de la permeabilidad real depende no sólo de la frecuencias, sino también de la magnitud del campo aplicado. Para campos pequeños (inferiores a 4 milioersteds), la permeabilidad viene a ser constante hasta 10 kilohertz; para campos aplicados superiores en este mismo intervalo de frecuencias, la permeabilidad muestra un comportamiento decreciente, pero el valor depende del campo. A frecuencias superiores a 10 kilohertz se observa un comportamiento único, independiente del valor del campo aplicado, en el que la permeabilidad disminuye hasta un valor pequeño, en el que subsiste hasta las frecuencias más altas, de 10 megahertz.

Para comprender estos resultados, hemos de refrescar nuestras ideas sobre las características de la estructura magnética de dominios. Esta consiste en regiones con magnetización espontánea homogénea, separadas por paredes magnéticas, que definiremos en seguida. Debido a la interacción de intercambio, que ocurre entre los espines de átomos vecinos, éstos tienden a ordenarse paralelamente. Sin embargo, la creación de flujo magnético en el exterior de la muestra necesita de una alta energía (la energía "magnetostática"); el sistema disminuye su energía total dividiéndose en dominios, y acaba por perderla con los dominios de cierre, que permiten conservar todo el flujo magnético en el interior de la muestra.

Los dominios están separados por las paredes magnéticas, que son zonas donde los espines efectúan una rotación paulatina desde la dirección de un dominio hasta la del dominio contiguo. Esta paredes representan una situación de equilibrio muy delicado, pues bastan campos magnéticos muy pequeños para provocar su desplazamiento.

Al moverse una pared magnética, ocurre una inversión de un gran número de espines, lo que se traduce en una variación de la magnetización. Estas variaciones pueden evaluarse por medio de la permeabilidad, que se define como la inducción magnética (que es la densidad de flujo magnético total) dividida entre el campo aplicado que la produce.

En ciertos materiales (denominados blandos), se han logrado valores de permeabilidad de 2 millones. Sin embargo, en todos los materiales los defectos estructurales (fronteras entre granos, dislocaciones, precipitados,



Comportamiento de la permeabilidad magnética de un material "suave" (Vitrovac 6025) a dos campos aplicados. Para el campo elevado, la permeabilidad de las bajas frecuencias disminuye rápidamente; para el campo pequeño, es casi constante hasta algunas decenas de kilohertz

etcétera) obstaculizan y anclan las paredes magnéticas. Un campo elevado logra desplazar las paredes; pero no regresan a su posición inicial ya que se anclan en una nueva posición, lo que conduce a una magnetización remanente.

Ese mecanismo de desanclaje-desplazamiento-anclaje en nueva posición permite comprender la histéresis magnética, propiedad en razón de la cual la magnetización no es una función unívoca del campo, sino que existen dos valores de magnetización para cada valor del campo aplicado: uno al incrementar el campo y otro (generalmente mayor que el anterior) al disminuir el campo aplicado.

Atendamos ahora a los mecanismos de magnetización responsables del comportamiento observado. Un mecanismo consiste en el desplazamiento de las paredes; otro, en la desviación de todos los espines hacia la dirección del campo; un tercero, por último, en la deformación "elástica" de las paredes que, permaneciendo ancladas, se comportan como una membrana elástica en el área entre los puntos de anclaje.

A bajas frecuencias y campos elevados, están activos los tres mecanismos. El de histéresis representa el mayor valor de permeabilidad, ya que los desplazamientos de paredes producen los mayores cambios en la magnetización; igualmente, estos desplazamientos dependen del campo aplicado. Se trata, no obstante, del mecanismo más lento, pues exige una complicada secuencia de eventos: abombamiento-desanclaje-desplazamiento-reanclaje-desabombamiento, en cada ciclo. Por eso mismo, desaparece a las frecuencias más bajas. Además, resulta inoperante si el campo aplicado es menor que el campo necesario para desanclar las paredes, que en este caso es de 4 milioersteds.

En cuanto a la rapidez de respuesta, le sigue el mecanismo de abombamiento de paredes. Es más veloz que el de histéresis, pues involucra un menor número de pasos; subsiste hasta cerca de 50 kilohertz. Finalmente, el mecanismo de más alta frecuencia es el de rotación de espines, ya que éstos poseen la dinámica más alta. La rotación de espines presenta, en general, un fenómeno de resonancia que aparece en la gama de los gigahertz, fuera del alcance del sistema aquí utilizado.

Se conoce ya la relación entre los elementos del circuito inductivo y los factores característicos de las paredes (su energía, factor de amortiguamiento, masa efectiva y otros). Así pues, la espectroscopía de inductancias constituye una técnica de investigación y análisis sumamente simple y poderosa.

RAÚL VALENZUELA
Instituto de Investigaciones
en Materiales, UNAM, México

Vídeo azul

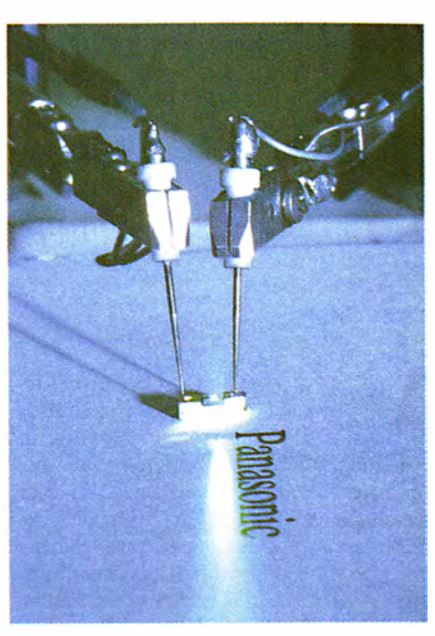
Dura competencia

Los investigadores dedicados a la grabación de discos ópticos de alta densidad buscan con singular tenacidad un mirlo... azul: el láser de semiconductor barato, azul y operativo a temperatura ambiente. La ventaja del bajo coste es obvia; quizá resulte necesario explicar por qué es deseable el haz de color azul y el funcionamiento a temperatura ambiente.

Durante el proceso de grabación óptica, el haz láser quema hoyos microscópicos en la superficie del disco maestro. Los hoyos son los portadores de la información que se recupera cuando otro láser los lee. Según Kinro Shimizu, de Pioneer, el tamaño de un hoyo que se puede inscribir o leer por un láser azul tiene la mitad de anchura y longitud que las del hoyo que inscribe un láser rojo. Lo que significa que el láser azul puede inscribir cuatro veces más información en un área dada. Reducir el área de los pozos no es cosa baladí: si un disco óptico corriente se ampliara hasta el tamaño de un campo de fútbol, cada hoyo vendría a ser del tamaño de un grano de arena. Haciendo más fina la pista y reduciendo la distancia entre hoyos, la capacidad del disco puede incrementarse en un factor adicional de dos y media a tres veces en total.

Para convertirlo en producto de consumo, el láser debe satisfacer otra condición. Ha de operar a temperatura ambiente. En marzo pasado, los expertos de Pioneer dirigieron un haz de 100 miliwatt procedente de un láser de semiconductor infrarrojo a través de un cristal no lineal de fosfato de titanil-potasio fabricado por Du Pont. El haz emergente, un segundo armónico a 425 nanómetros, resultó suficientemente estable para leer datos de un disco óptico de alta densidad en condiciones de laboratorio. A principios de abril, los de Matsushita consiguieron luz azul de un láser de semiconductor usando el mismo método de generación del segundo armónico.

No obstante, otro grupo de Matsushita, dirigido por Tsuneo Mitsuyu, desarrollaron un diodo láser que emite destellos de luz con una longitud de onda de 509 nanómetros. Mitsuyu se halla enfrascado en un láser de estado sólido que genera una señal continua azul. Para ello se requiere un nuevo material semiconductor con un amplio intervalo de banda, el seleniuro de zinc por ejemplo...



Luz azul de una longitud de onda de 509 nanómetros, emitida por un diodo láser

Masahito Migita, de Hitachi, investiga otros dos posibles compuestos con los cuales producir diodos láser azul: el telururo de zinc, cadmio, magnesio, azufre y selenio y el nitruro de galio, aluminio e indio. El equipo de Hitachi están experimentando con el método de generación del segundo armónico. NEC y Toshiba se han lanzado también a la búsqueda del láser azul.

En el verano de 1993, un grupo de investigación de Sony hizo funcionar con éxito un láser azul de onda continua a la temperatura ambiente. El diodo láser experimental de Sony emite luz a una longitud de onda de 489,9 nanómetros, más próxima a la región verde del espectro que a la violeta. Por la misma época obtenían resultados similares universitarios de Brown y Purdue. En IBM se han usado con éxito cristales de niobato de potasio como medio no lineal en el cual duplicar la frecuencia de los diodos láser de arseniuro de galio.

Pero no confundamos el éxito experimental con la disponibilidad comercial. El láser azul que lea y registre una película de dos horas de duración en un disco del tamaño de un compacto está todavía a años de distancia.

ROBERT PATTON

Taller y laboratorio

John Iovine

Manipulación genética de Escherichia coli

Vacas que den leche con fármacos o plantas resistentes a las plagas son sólo dos de los innumerables beneficios que nos promete la ingeniería genética. Si bien introducir a voluntad determinados caracteres en los genomas de vacas y plantas puede resultar difícil, la manipulación genética de las bacterias es bastante sencilla. Siguiendo los pasos que aquí se resumen, le será posible al lector insertar un gen resistente a la penicilina en la enterobacteria *Escherichia coli*. Transformaciones análogas ocurren con gran frecuencia de forma natural; tal es el caso de las bacterias resistentes a los antibióticos que proliferan en los hospitales.

Como *E. coli* habita en nuestro intestino, no hay que preocuparse demasiado. Pero no se olvide de los procedimientos de esterilización que se describen y que le asegurarán que no ingiere sin querer la pócima de las placas de petri, pócima que contiene nada menos que *E. coli*.

El truco de la manipulación genética de la bacteria *E. coli* consiste en engañarla, hacerle creer que un gen foráneo es de su propio genoma. En nuestro caso, vamos a injertar el gen resistente a la penicilina en un plásmido de *E. coli*. Los plásmidos son bucles circulares de ADN que existen, independientes de los cromosomas, en las células. Una vez alterados, los plásmidos pueden retornar a la célula y permitirnos así introducir de contrabando el gen en la bacteria. Después, los plásmidos se replicarán en el interior celular y producirán proteínas, incluidas las que dan origen al carácter o rasgo que deseamos; más aún, se reproducirán a través de generaciones sucesivas. De ese modo, el gen se transmite a toda la descendencia, comunicando sus propiedades de resistencia a toda la colonia de *E. coli* que descienda de los individuos modificados.

En este experimento formaremos tres tipos de plásmidos recombinantes, llamados pAMP, pKAN y pAMP/pKAN, merced a un proceso de ligadura. Al inyectarlos en *E. coli*, conferiremos a la bacteria resistencia contra la ampicilina (pAMP), la kanamicina (pKAN) y contra la ampicilina y kanamicina a la vez (pAMP/pKAN). Para observar los resultados de nuestras manipulaciones, cultivaremos luego colonias de *E. coli* genéticamente modificada en placas tratadas con ampicilina y kanamicina.

Respecto a los materiales que precisaremos para el experimento, sugiero la compra de un equipo de recombinación de ADN (un "kit"). Necesitará, además, un acuario (u otro recipiente de volumen parecido), un mechero Bunsen y algunas cosas más que listamos en el recuadro adjunto.

Primero hay que construir una incubadora donde medren nuestras colonias de *E. coli*. Un acuario de vidrio de 75 litros nos iría muy bien; si no tiene un acuario, puede emplear cualquier receptáculo del mismo volumen, tal como un embalaje de cartón. Coloque el acuario con la cara abierta enfrentada a usted. Con cinta adhesiva, sujete un trozo de plástico al borde superior del acuario de manera que cuelgue hacia abajo tapando la abertura a modo de cortina. Esta tendrá que levantarla y bajarla repetidamente para acceder al interior del receptáculo.

La temperatura óptima para cultivar *E. coli* es la del cuerpo humano, o sea, 37 grados; lo que no es sorprendente, habida cuenta donde vive. Para caldear la incubadora, introduzca en ella una lámpara de incandescencia común, encerrada en una lata o en un cubo pequeño. Yo necesité una bombilla de 75 watt para calentarla hasta los 33 $^{\circ}$C (aunque menor que la temperatura óptima, funciona bien). Empiece con una bombilla de poca potencia, de 40 watt por ejemplo, y mida la temperatura al cabo de 12 a 24 horas; si es necesario, aumente la potencia. Si la incubadora se calienta por encima de los 37 grados, reduzca la potencia (un poco más de frío es mejor que un poco más de calor). Si al cambiar la bombilla no consigue lo que quiere, intercale un regulador de intensidad luminosa para ajustar la potencia de la lámpara y, por tanto, la temperatura.

Es recomendable que la incubadora esté preparada cuando llegue el equipo de recombinación. Abra el kit y refrigere las placas de cultivo, poniéndolas boca abajo, junto con los viales de plásmidos pAMP y pKAN y cloruro cálcico (necesario para acondicionar las bacterias). Congele el vial de ligasa/tampón de ligadura/ATP. Los otros materiales pueden guardarse a temperatura ambiente. Justo antes de iniciar el experimento, limpie la incubadora y la zona de trabajo con una solución al 10 por ciento de lejía (hecha con una parte de Clorox y nueve de agua) o un desinfectante, como Lysol. Desinfecte también después de cada sesión y lávese las manos con un jabón antibacteriano, antes y después. Mantenga inmaculada la zona de trabajo y desinfecte todos los útiles, tales como tubos, pipetas y espiras de transferencia, sumergiéndolos en la solución de lejía.

El paso siguiente es incubar y cultivar las bacterias *E. coli* en una placa de cultivo. Las placas de cultivo contienen caldo Luria, o LB ("Luria broth"), que proporciona los nutrientes de los que se alimentan las bacterias. Necesitaremos estas colonias de *E. coli* durante el resto del experimento. Encienda la lámpara de alcohol o el mechero Bunsen. Tome una placa de cultivo con la etiqueta "LB" y rotule el fondo así:"*E. coli*". Anote en él también la fecha.

Tome la espira de alambre de inoculación del kit y esterilícelo colocándolo en la llama de la lámpara o el mechero. Espere a que el alambre se ponga al rojo, retírelo entonces de la llama y sosténgalo durante algunos segundos para que se enfríe. No lo suelte; eso lo contaminaría.

Coloque el vial de cultivo de *E. coli* en su otra mano y retire el tapón con el meñique sosteniendo la espira de inoculación. Con el tapón fuera, pase brevemente por la llama la boca del vial para esterilizarla.

Levante la tapa de la placa de cultivo marcado "*E. coli*", pero sólo lo suficiente para introducir la espira de inoculación. Introduzca la espi-

ra por el costado de la gelatina que contiene la placa para enfriarla. A continuación, pase la espira varias veces por el interior del vial que contiene el cultivo de *E. coli*. Retire la espira, pase la boca del vial por la llama y vuelva a taparlo.

Pase la espira por la superficie gelatinosa trazando una raya en forma de Z en uno de los cuadrantes de la placa. Coloque otra vez la tapa.

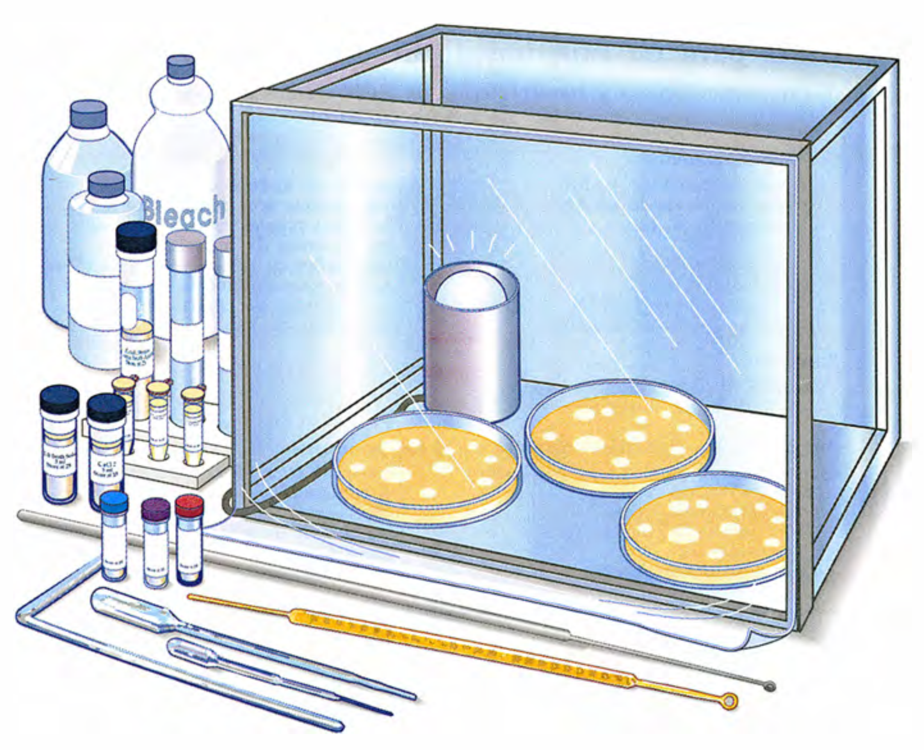
Gire 90 grados la placa de cultivo, vuelva a calentar la espira y enfríela pinchando el gel en un punto alejado de la primera raya. Pase luego la espira una vez por la primera raya y describa otra Z. Repita dos veces las maniobras de girar la placa, pasar la espira por la llama y trazar zigzags en la superficie, de suerte que al final haya cuatro rayas en zigzag, una en cada cuadrante de la placa. Vuelva a poner la tapa.

Antes de soltar la espira, vuelva a pasarla por la llama para no contaminar la zona de trabajo. Convierta esos pasos en un proceso rutinario.

Dentro de la incubadora coloque la placa boca abajo para que la condensación que pudiera recogerse en la tapa no caiga en las colonias de *E. coli*. Incube la placa durante 12 a 24 horas, no más. Después, retírela de la incubadora y deje que las colonias se desarrollen durante uno o dos días a temperatura ambiente.

El paso siguiente es enlazar fragmentos de ADN resistente a los antibióticos con los plásmidos de *E. coli*. Los viales de pAMP y pKAN contienen esos fragmentos de ADN y también los plásmidos; un reactivo llamado ligasa inserta los fragmentos de ADN y vuelve a soldar los bucles plasmídicos. (El ATP de la solución de ligadura proporciona la energía necesaria para la reacción de enlace.) De hecho, en el proceso se forman numerosos tipos de moléculas híbridas; no obstante, sólo las conformadas correctamente se mantendrán y manifestarán en las células.

Saque del congelador los tres viales que contienen cada uno 20 microlitros de ligasa/tampón de ligadura/ATP. Etiquete uno con "+pAMP/KAN", otro con "+pAMP" y el tercero con "+pKAN". Saque los tubos con las etiquetas "pAMP" y "pKAN". Con una pipeta estéril de punta cónica, una por cada reactivo, añada 10 microlitros de pAMP y 10 microlitros de pKAN al vial +pAMP/KAN, 10 microlitros de pAMP y 10 microlitros de agua destilada al vial +pAMP, y 10 microlitros de pKAN y 10 microlitros de agua destilada al vial +pKAN. Cierre las tapas de los viales y dé a éstos unos golpecitos muy suaves en el fondo para que se mezclen los reactivos. Incube los viales a temperatura ambiente durante 12 a 24 horas. Ahora el vial +pAMP/KAN contiene plásmidos que resisten tanto a la ampicilina como a la kanamicina, el vial +pAMP contiene sólo los resistentes a la ampicilina y el vial +pKAN sólo los resistentes a la kanamicina.



1. Escherichia coli *medra en discos de petri dentro de un acuario de incubación. Tubos de cultivo, pipetas y otros materiales esperan al experimentador*

Convirtamos las células de *E. coli* en "aptas" para absorber los plásmidos recombinantes. Para ello, hay que formar una suspensión de células de *E. coli* en una solución de cloruro cálcico fría y someterla a un breve choque térmico a 42 grados. No se conoce bien el modo en que el ADN es absorbido por las células aptas de *E. coli*.

Prepare un baño de agua para someter las bacterias a un choque térmico; lo necesitará sólo durante 90 segundos. Puede emplear un calefactor de acuario para elevar hasta 43 grados la temperatura del agua de un recipiente (un par de grados más o menos no importan). En caso de necesidad, deje correr agua del grifo ajustando la temperatura.

Tome cuatro tubos estériles de 15 mililitros. Etiquételos "+pAMP/KAN", "—pAMP/KAN", "+pAMP" y "+pKAN", respectivamente. Con una pipeta esterilizada de transferencia, añada a cada tubo 250 microlitros de cloruro cálcico frío. Deje los tubos en un cuenco con hielo triturado.

Con una espira de inoculación de plástico esterilizada extraiga una o dos colonias de *E. coli* de la placa inicial de LB. Cuide de no sacar gel de la placa. Sumerja la espira en la solución de cloruro cálcico del tubo +pAMP/KAN y golpee el costado de éste para desprender la masa celular. Para poner en suspensión las células dentro de la solución, extraiga y vuelva a introducir repetidamente el líquido con una pipeta esterilizada de transferencia. Retorne al hielo el tubo +pAMP/KAN. Transfiera por el mismo procedimiento colonias de células a los otros tres tubos que tiene en hielo.

En cada una de las operaciones siguientes emplee una pipeta de punta cónica nueva. Traspase 10 microlitros de plásmido ligado +pAMP/KAN desde el vial adecuado al tubo de cultivo +pAMP/KAN. Añada 10 microlitros de +pAMP ligado al tubo de cultivo +pAMP y 10 microlitros de +pKAN ligado al tubo de cultivo +pKAN. Pero no transfiera material alguno al tubo de cultivo —pAMP/KAN; este último tubo debe contener únicamente *E. coli* inalterada. Devuelva todos los tubos al hielo y déjelos reposar durante 15 minutos.

Tras la incubación en hielo, llegó el momento de someter a choque térmico a las células de *E. coli*. Retire todos los tubos del hielo y sumérjalos al instante en el baño de agua a 42 grados durante 90 segundos. A continuación retórnelos directamente

Utiles para un experimento de manipulación genética

Kit de recombinación y transformación de ADN ensamblador de genes E-Z.
N.º de artículo 21-1160

El kit comprende:

Un vial de plásmido pAMP
Un vial de plásmido pKAN
Un cultivo de *E. coli*
Tres placas LB
Dos placas LB/AMP
Dos placas LB/KAN
Dos placas LB/AMP/KAN
Tres viales de ligasa/ligadura
Un vial de cloruro cálcico
Doce pipetas con boquilla de aguja
Dieciocho pipetas esterilizadas de transferencia de un mililitro
Cuatro tubos de cultivo estériles de 15 ml
Cinco espiras de inoculación estériles
Un repartidor de células de vidrio
Un manual de uso

Proveedor:

Carolina Biological Supply Company
2700 York Road, Burlington, NC 27215 (910)584-0381

Además de los materiales incluidos en el kit, se necesita:

Lámpara de alcohol o mechero Bunsen
Jabón antibacteriano
Un acuario o un cajón
Vasos picudos o cuencos (dos)
Hielo triturado
Agua destilada (un poco)
Etanol (al 70 a 95 por ciento)
Un rotulador
Lejía casera, como Clorox (un poco)
Una lámina de plástico para cubrir el acuario
Un termómetro

al hielo. Manténgalos allí durante tres o cuatro minutos.

Para que nuestras bacterias tengan que comer, con una pipeta estéril de transferencia añada 250 microlitros de caldo Luria a cada tubo. Con el dedo golpetee suavemente los tubos, para que el caldo se disuelva, e incube los tubos a 37 grados durante tres a seis horas. Con suerte, las enterobacterias deberán estar ya suficientemente conmocionadas para absorber los plásmidos de su entorno.

Por último, podemos comprobar si nuestras *E. coli* han adquirido resistencia contra la ampicilina y la kanamicina. Algunas de las placas de cultivo del kit contienen ya los antibióticos que deben enfrentarse a nuestras *E. coli* y así están marcadas. Las placas marcadas "LB" contienen sólo caldo Luria; una de ellas etiquétela con "+LB" y la otra con "—LB"; en ellas cultivaremos las *E. coli* modificadas y sin modificar, respectivamente. Etiquete con "+pAMP/KAN" una de las placas LB/AMP/KAN; a ella, que contiene ampicilina y kanamicina, agregaremos las células de *E. coli* resistentes (esperemos) contra los dos antibióticos. Etiquete con "—pAMP/KAN" la otra placa LB/AMP/KAN; a ésta añadiremos sólo bacterias *E. coli* sin alterar. Etiquete con "+pAMP" una de las placas LB/AMP y la otra con "+pKAN"; a estas placas (tratadas con ampicilina) añadiremos *E. coli* resistente, respectivamente, a la ampicilina y kanamicina. Una de las placas LB/KAN etiquétela con "+pKAN" y la otra con "+pAMP".

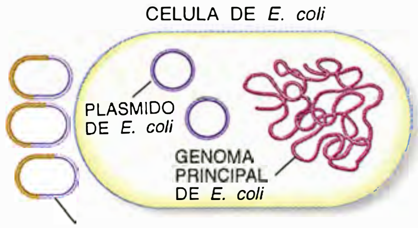
Con una pipeta esterilizada de transferencia, agregue 100 microlitros de la suspensión celular del tubo de cultivo —pAMP/KAN a la placa —LB y también a la placa —LB/AMP/KAN. Antes de esparcir las células por la superficie del gel, esterilice el extendedor de vidrio. Sumerja éste en el alcohol, hecho llama con el mechero Bunsen o la lámpara de alcohol. Cuando el etanol se haya consumido, el extendedor estará preparado. Con él distribuya las células de *E. coli* regularmente sobre el gel.

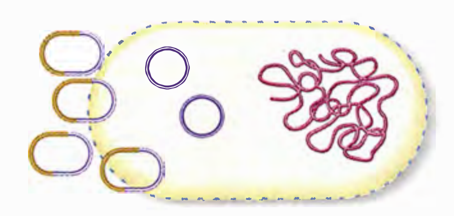
Valiéndose de otra pipeta esterilizada de transferencia (una para cada cultivo) añada 100 microlitros del cultivo del tubo +pAMP/KAN a la placa +LB y también a la +LB/AMP/KAN. Como antes, distribuya la suspensión de células esterilizando cada vez la varilla de vidrio. Añada 100 microlitros del contenido del tubo de cultivo +pAMP a cada placa +pAMP y +pKAN y luego espárzalo. Añada 100 microlitros del contenido del tubo de cultivo +pKAN a las placas +pAMP y +pKAN y luego espárzalo.

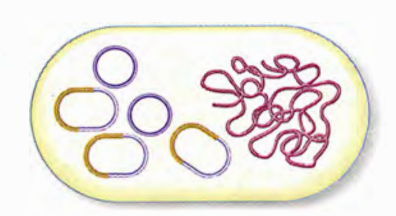
Espere 10 minutos a que las placas se gelifiquen. Seguidamente, apílelas y sujételas unas a otras con cinta adhesiva. Métalas cabeza abajo en la incubadora a 37 grados e incúbelas durante 12 a 24 horas. Téngase cuidado, porque, si las colonias se hiperincuban, se desarrollarán demasiado y no podrán distinguirse.

En ese momento estará usted en condiciones de comprobar los resultados de su experimento. En las placas +LB y —LB, se desarrollan perfectamente tanto las *E. coli* transformadas como las silvestres. En el caso de las placas LB/AMP/KAN, que contienen ampicilina y kanamicina, las bacterias se desarrollarán en el etiquetado "+AMP/KAN" pero no en el

2. El ADN recombinante se forma cuando las enzimas trocean un plásmido de E. coli *y un fragmento circular de ADN y luego vuelven éstos a juntarse. Sus extremos se sueldan con ligasa; dentro de la célula sólo sobrevivirán aquellos recombinantes que estén correctamente orientados*







3. Oculto en un plásmido alterado, y utilizando a éste como vector, el ADN resistente a los antibióticos penetra en un célula de E. coli. *Los plásmidos no pueden penetrar en la célula (*arriba*) hasta que ésta se torne receptiva* (centro)*. A su entrada, el ADN recombinante es aceptado como parte del material genético de la célula (*abajo*). Podrá entonces fabricar proteínas y reproducirse*

etiquetado "—AMP/KAN", lo que demuestra que sólo pueden crecer las tratadas con genes resistentes, a la vez, a la ampicilina y la kanamicina. Las placas LB/AMP ilustran que el gen para pAMP, y no el gen para pKAN, confiere resistencia contra la ampicilina. Las placas LB/KAN ilustran que el gen para pKAN, y no el gen para pAMP, confiere resistencia contra la kanamicina.

Midiendo el crecimiento de las colonias, puede comprobarse que la ligadura de dos genes, pAMP y pKAN, es más difícil que una ligadura simple: las colonias +pAMP/+pKAN son menos densas (de cinco a 50 colonias) que las colonias +pAMP o las +pKAN. Además, la ligadura del gen pKAN es más difícil (de 50 a 500 colonias) que la del gen pAMP (de 100 a 1000 colonias).

Cuando haya conseguido sus bacterias genéticamente modificadas, habrá visto que en principio la tarea no es tan difícil. Otra cosa sería si hubiera de habérselas con vacas y plantas. Por problemas de incubadora, por ejemplo.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

¿Cuántos vigilantes ha de tener la galería?

Era la reunión mensual de directivos de la compañía Fontieso. Tete Fontieso, el gran jefe, movió afirmativamente la cabeza con visible satisfacción al ver que el presidente de la sesión pasaba al último punto del orden del día, la Colección Warthog, que había de ser expuesta en una galería de la tecnología más puntera (a Fontieso le gustaba decir que era una galería "estado del arte") dedicada monográficamente a la obra completa del incomparable Sandy Warthog. Fontieso, uno de los primeros admiradores del resbaladizo y vidrioso estilo desvialista de Warthog, poseía todas las obras que habían salido del estudio del artista.

"La seguridad va a constituir un problema importante", apuntó el director de finanzas.

"Como es natural, la colección Warthog será dotada de los más modernos equipos de vigilancia electrónica", dijo Harry Sams, jefe de seguridad. "Cada uno de los cuadros será enfocado por una microcámara especial y..."

Fontieso le interrumpió. "No. Nada de eso. Para la colección Warthog quiero algo verdaderamente especial."

"Euh... ¿Cómo de especial?"

"Especial de verdad, Harry. Quiero vigilancia; quiero vigilancia humana. Personas, Harry. Quiero guardas."

"Tete... Guardas, muy bien. De acuerdo. Euh... ¿cuántos guardas, Tete?"

"Los que hagan falta para garantizar que cada centímetro del edificio pueda ser visto al menos por un vigilante. Quiero que cada guarda se siente en una silla giratoria, para que cada uno pueda tener visión circular completa. Contrata los vigilantes que hagan falta, pero ni uno más, ¿entendido? Por si no lo sabías, los guardas humanos cuestan dinero de verdad."

"Sí, Tete, señor, quiero decir que así se hará, señor Fontieso. Y... euh... ¿están listos los planos de construcción del edificio?"

"Todavía no."

"Entonces va a resultar un poco difícil calcular el número preciso."

"El arquitecto ha decidido que el edificio será de una sola planta y que va a tener 24 paredes rectas, una para cada uno de los estilos definitivos de Warthog. Voy a hacer lo siguiente: dado que has de basarte en información inadecuada, te autorizo a contratar el número justo de guardas necesarios para mantener vigilancia continua sobre una sala de 24 paredes rectas, cualquiera que sea su forma, suponiendo que cada vigilante ocupa una posición fija y que puede ver todo cuanto le rodea. Pero no quiero que contrates ni uno más de los estrictamente necesarios. Si luego resulta que el número de guardas necesarios para la colección Warthog es menor que el máximo teórico, aceptaré la responsabilidad. Pero si *ningún* diseño de la galería exige utilizar todos los que contrates —o si, por el contrario, no contratas los suficientes— entonces... Harry espero que tengas la suerte de que alguien tenga empleo para ti."

Cuando se es un alto cargo y uno se está jugando el puesto, no se anda por las ramas: se echa mano del talonario de la empresa, se recurre a los mejores asesores, aunque pidan un pastón, y se les encarga que resuelvan el problema. Harry los encontró en la guía telefónica: un equipo llamado Matheuristas Monte-Luz.

"Señor Sams, el problema es dificultoso", dijo Monte.

"Verdaderamente difícil", agregó Luz, a pesar de que ya sabía la solución. Pero mareando al cliente con esas exageraciones se gana dinero.

"La pega está en que hay una enormidad de distintas formas de situar 24 líneas rectas." Monte y Luz habían adquirido la costumbre de hablar por turno.

"Y el número de vigilantes necesarios depende de la disposición que se elija."

"Por suerte, disponemos de algunas técnicas bastante buenas. Pertenecen a lo que en el oficio conocemos por Teoremas de Exposiciones."

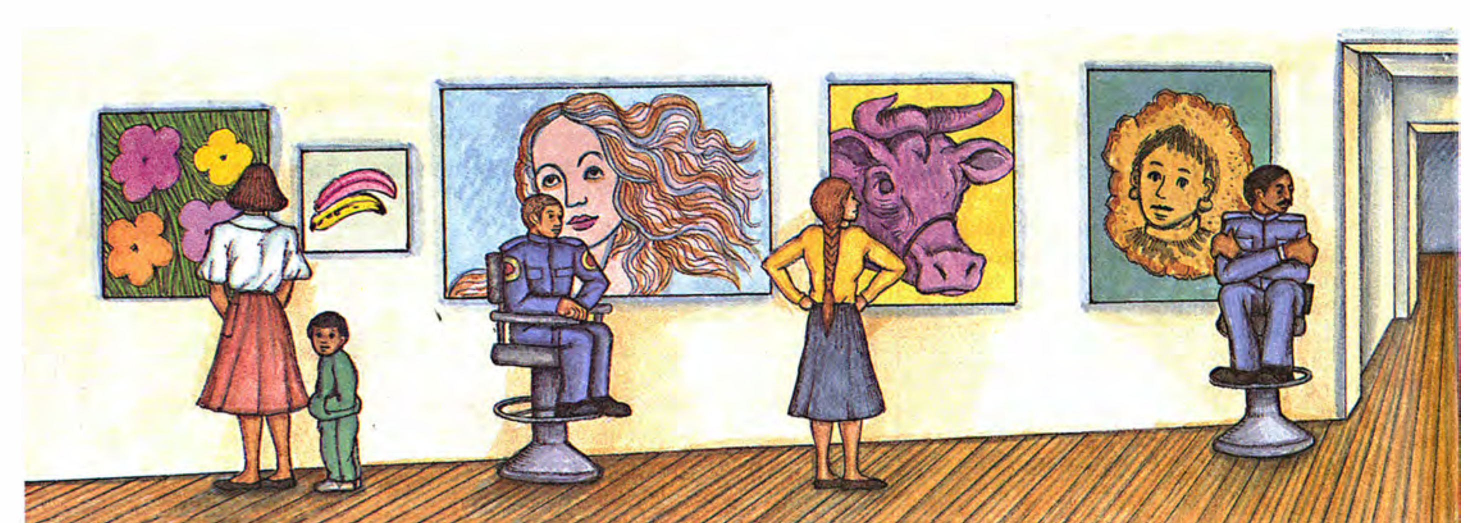
"Sí, verá. Por ejemplo, si una sala sólo necesita un guarda, la sala ha de tener forma de estrella, o como dicen los matemáticos, ha de ser un dominio 'estrellado' o asteriforme."

"Lo cual significa que ha de existir un punto, sea interior o del contorno, tal que todo punto de la sala pueda ser conectado con él mediante un segmento rectilíneo enteramente contenido en la sala."

"Imaginemos ahora que hay dentro de la sala cierto número de guardas, situados del modo que se quiera. Cada uno de ellos se encuentra en una región estrellada, a saber, la parte de la sala que esta persona alcanza a ver. Por lo tanto, lo que usted pregunta es..."

"...cuál es el número mínimo de

1. Una galería "estado del arte" aloja la colección Sandy Warthog



regiones asteriformes en que puede ser descompuesta una estancia cualquiera que tenga 24 paredes", terció Monte, trazando rápidamente unos esbozos en su libreta de notas [*figura 2*].

"¡No me diga!", exclamó Harry.

"Así pues, en esta sala concreta, situando los guardas en esta disposición particular, observamos que los tres vigilantes señalados alcanzan a ver la sala entera, excepto seis regiones separadas", prosiguió Monte.

"Las cuales son convexas", apostilló Luz.

"Y en particular, eso significa que son asteriformes."

"En consecuencia, situando un guarda más en cada una de ellas (lo que da un total de nueve) la sala entera estaría a la vista."

"¡Estupendo!", exclamó Harry. "Así pues, ¿tengo que contratar nueve guardas?"

Monte y Luz menearon la cabeza negativamente con cierta suficiencia. "De ninguna manera, señor Sams. Primero porque podría suceder que en esta sala concreta bastase con menos guardas debidamente distribuidos..."

"Y por otra parte, porque en otra sala pudieran hacer falta más."

"En resumen", dijo Sams, "puede que la solución sea nueve, o bien puede que más, o puede que menos."

"Lo ha entendido muy bien."

"Bueno, muchachos, ¿cuánto os estamos pagando...?"

"Todavía estamos tomándole el pulso al problema, señor Sams", se excusó Monte. "Evidemente, en este caso hay que ser sistemático."

"Cuando el caso ofrece dudas, deshazlo en partes menudas", recitó Luz. "Tenemos que descomponer la sala en piezas más sencillas y procurar luego ensamblarlas en regiones asteriformes de la manera más eficiente que sea posible."

"Muy bien. ¿Y cómo sugieres que lo hagamos, Luz?"

"Si pretendes acertar, conviene triangular. Me parece, Monte, que lo más natural será formar triángulos, ¿no crees tú?"

"Sí, pero hay muchísimas formas de dividir una sala en triángulos."

"Desde luego. Propongo que lo hagamos sin introducir nuevos vértices." La joven se volvió hacia Sams. "Es un término técnico de la profesión para los puntos situados en las esquinas." Sams asintió con la cabeza.

"¿Quieres decir que sólo hay que usar los vértices que ya tiene la sala?", preguntó Monte. "¿Y será posible siempre?"

"Claro. Puedo demostrártelo, si quieres."

"No, no, continúa. Esto empieza a ponerse interesante."

"A continuación voy a marcar cada uno de los vértices de la sala usando sólo tres colores (rojo, amarillo y azul, sea por caso), de forma que cada triángulo tenga exactamente un vértice de cada color. Coloreemos un triángulo particular cualquiera utilizando un color distinto en cada vértice y vayamos luego hacia afuera, por así decirlo. Los colores de cada triángulo adyacente están completamente determinados, porque hay en ese triángulo exactamente un vértice que no esté coloreado ya, para el que se usa el color distinto que haga falta. Se prosigue de manera sistemática y se colorean todos los vértices."

"Cabal. Fíjate ahora en lo que pasa cuando hacemos eso en su diagrama. Acabamos teniendo seis vértices rojos, nueve azules y nueve amarillos. Si colocamos un vigilante en cada uno de los vértices rojos tenemos controlada la sala entera, puesto que cada guarda puede ver cada triángulo del cual sea él un vértice..."

"...y cada triángulo contiene un vértice rojo. ¡Claro! ¡Muy elegante! Para esta sala sólo necesitamos seis guardas, y no los nueve que encontramos al principio. Y los colocaremos en las *esquinas*."

"En los vértices." Luz se inclinó hacia delante, con gesto intrigado en el rostro. "Vamos a ver, Monte, amigo mío, ¿te das cuenta de cómo generalizar el razonamiento?"

Monte se puso a dar vueltas por la habitación gesticulando animadamente con los brazos. "Ya, ya. Si la sala tiene 24 paredes, tendrá también 24 vértices. La descomponemos en triángulos y los coloreamos de acuerdo con tus reglas; después elegimos el color que aparezca menos veces y situamos a los vigilantes en los vértices correspondientes."

"Muy bien. Ahora, el número total de vértices rojos, azules y amarillos es 24, así que cualquiera que sea la asignación de los colores, al menos uno de ellos aparecerá ocho veces como máximo."

"¿Quieres decir que es imposible que tres números que suman 24 sean los tres mayores o iguales que nueve? ¡Obvio!"

Luz sonrió de oreja a oreja. "Pues entonces he demostrado que *cualquier* sala que tenga 24 paredes puede ser completamente vigilada con un máximo de ocho guardas."

"Un momento", terció Sams, que había estado prestando oído al toma y daca. "Hace un momento dijo usted que en esta sala concreta sólo hacen falta seis guardas, no ocho."

"Eso es cierto, señor Sams. Pero nosotros tenemos que calcular el número mínimo de guardas suficientes para mantener la seguridad en *cualquier* sala que tenga 24 paredes. Y lo que acabamos de demostrar es que ese número es, a lo sumo, ocho."

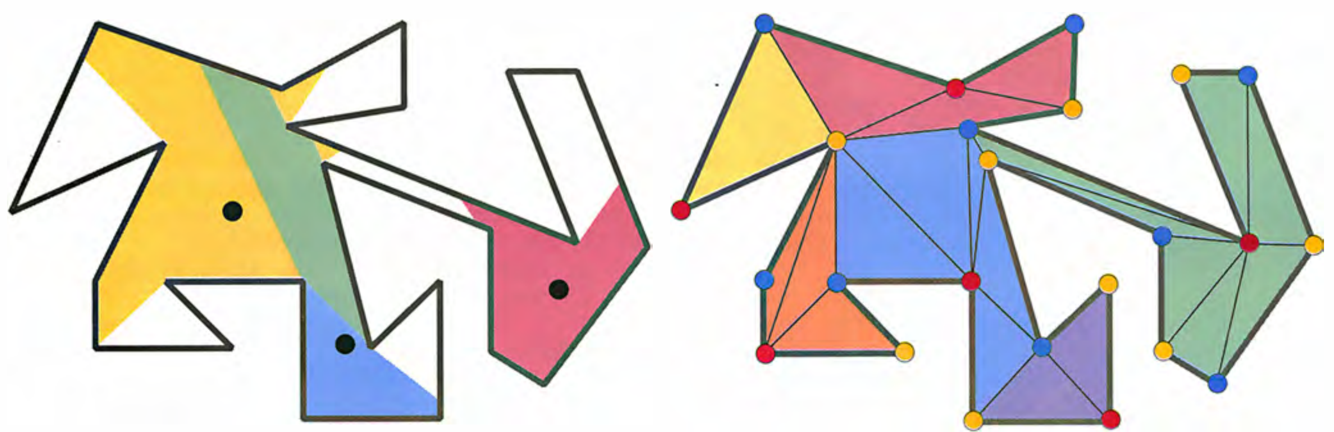
"Lo que tenemos que hacer ahora es dar con una sala de 24 paredes que obligue a utilizar precisamente ocho."

"Lo cual es fácil", dijo Monte. "Esta servirá." Trazó un rápido esbozo [*véase la figura 4*]. "Los guardas han de poder ver hasta el fondo de los ocho nichos triangulares, lo que da ocho regiones que no se traslapan, así que cada una ha de contener un guarda distinto. Por otra parte, la disposición de mis vigilantes demuestra que podemos arreglárnoslas con ocho."

"Pero los guardas no se encuentran en los vértices", protestó Harry.

"*Podemos* situarlos en los vértices si queremos, y para la demostración general conviene hacerlo así", dijo





*2. Tres guardas (*puntos negros*) emplazados en las regiones asteriformes que pueden vigilar sin moverse. Fijémonos en que las regiones azul y amarilla se superponen (*región de verde*). Varias zonas de la galería quedan fuera de la vista de los vigilantes*

*3. Se colorean los vértices de un recinto de modo que cada triángulo contenga una sola vez a cada color. Los guardas se sitúan en los vértices cuyo color aparezca menos veces. Este método garantiza una solución con [*n*/3] o menor número de guardas para salas con* n *paredes*

Monte pacientemente. "Pero *no es obligatorio*, y en este caso resulta más sencillo no hacerlo."

"Okay", dijo Sams. "Ocho guardas. Estupendo. Le diré a Tete Fontieso que el problema está resuel..." Sonó el teléfono y Sams levantó el auricular. Afirmó varias veces con la cabeza, rezongó por lo bajo y depositó cuidadosamente el aparato sobre el escritorio. Después agarró un florero y lo lanzó con furia contra la pared de enfrente.

"¿Malas noticias, señor Sams?", dijo Luz, creyendo actuar con tacto.

"Ese condenado arquitecto ha cambiado por completo las especificaciones", clamó Sams, exasperado. "Ahora van a ser 173 paredes, de manera que las telas puedan agruparse por contenido temático además de por períodos estilísticos."

"No hay problema, señor Sams. Tenemos un método general que sigue siendo aplicable al nuevo proyecto. Si se colorean los vértices de la sala aplicando las reglas de Luz, bastará situar los guardas donde tengamos el color que menos aparezca. Ahora bien, si tres números suman 173, uno de ellos tendrá que ser a lo sumo igual a 173/3 = 57 2/3."

"¿57 2/3 guardas, dice usted? A Tete no va a gustarle nada."

"No, no. Significa que alguno de los colores aparece como máximo 57 veces, así que podemos arreglarnos con 57 guardas. Y una figura parecida a la que dibujé yo [*véase la figura 4*] demostrará que no es posible en general resolverlo con menos."

"Lo que hemos demostrado", añadió Luz, "es que una sala con n vértices necesita a lo sumo [n/3] guardas, fórmula en la que los corchetes significan 'parte entera'. Esta solución fue descubierta por el matemático checo Václav Chvátal en 1973. La demostración que presenté es una simplificación debida a Steve Fisk, del Colegio Bowdoin, en 1978 y..."

Volvió a sonar el teléfono. Sams respondió. "¿Querrán ustedes creerlo? Después de todo esto, va el arquitecto y vuelve a cambiar a una sala de 24 lados. Ahora nos sale con que hay demasiada controversia sobre la clasificación por temas de la obra de Warthog. Vale; vosotros, chicos, le pasáis a la compañía un cargo por el tiempo que habéis invertido, y me enviáis un informe completo acompañado de un resumen ejecutivo antes del jueves. Tengo que asistir a una reunión con Tete Fontieso."

"Nosotros somos grandes admiradores de Tete Fontieso", dijo Monte.

"¿No podríamos ir nosotros también?", le suplicó Luz. "Nos encantaría conocer a ese gran hombre. Seguramente nunca se repita la ocasión."

Sams lo sopesó unos momentos y finalmente accedió. No le haría daño su apoyo moral, después de todo. Por si surgiera alguna cuestión técnica de última hora.

"Ocho guardas, dices, ¿eh? Buen trabajo, Harry, buen trabajo." Fontieso estaba absolutamente encantado. "Por suerte, el arquitecto acaba de tomar la decisión definitiva sobre la disposición de la galería. Así podrás señalarme los puntos donde estacionar los vigilantes." Extendió los planos sobre el escritorio [*figura 5*].

Sams echó un vistazo al cartapacio. Se quedó helado y volvió desesperanzado la mirada hacia Monte y Luz. Monte tocó a Luz con el codo y le susurró: "¡Jo! Tiene *huecos*. Nadie habló de huecos para nada. En esa sala no vamos a poder arreglárnoslas con ocho guardas. Basta una ojeada para comprenderlo."

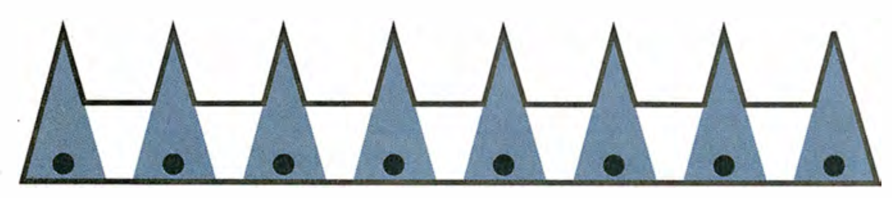
"No. Humm... Hay una conjetura que dice que con h huecos y n paredes..."

"¿Contadas también las paredes de los huecos?"

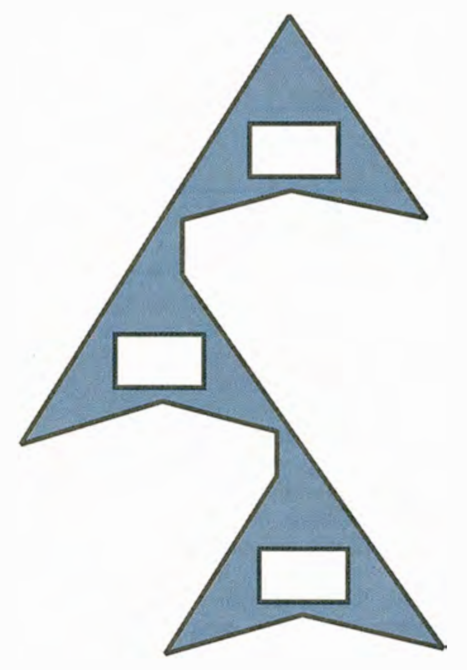
"¿Eh...? Sí, claro, desde luego... Entonces el máximo número de guardas que podrían hacer falta es [(n + h)/3]. Los planos muestran que n = 24 y h = 3, así que nueve guardas tendrían que ser suficientes..."

"¿Qué están murmurando ustedes dos?", intervino Fontieso, receloso.

"Le rogamos que nos disculpe, señor. Estábamos —¿cómo diría?— admirando el diseño del arquitecto." Luz le hizo a Monte un guiño de complicidad y sacó un bolígrafo del bolsillo. "Ahora bien, como ha explicado el señor Sams, con 24 paredes siempre podemos arreglárnoslas con ocho guardas. Más un superintendente, claro está, porque alguien tiene que estar al mando y cuidar de que



4. Una sala de n *= 24 paredes que requiere [*n*/3] guardas*



5. ¿Qué sucede cuando hay huecos? Este problema aún no está resuelto. Para la galería de la figura hacen falta nueve guardas. ¿Dónde han de estar situados?

el trabajo se haga bien. ¿No estoy en lo cierto, señor Sams?"

Sams, a quien el sudor ya le perlaba la frente, consiguió dominarse y adoptar su compostura habitual. "Sí, señorita Luz; como es natural, pensaba añadir también un superintendente."

"Por lo tanto, señor, harán falta nueve vigilantes en total, justo como el señor Sams estaba diciendo."

"Todo vendrá detallado en el resumen ejecutivo, Tete", añadió Sams, recobrado el aplomo.

Miró a Monte y Luz con el rabillo del ojo y fue recompensado con sendos gestos afirmativos casi imperceptibles. Nueve vigilantes. ¿No había sido ése el primer número que habían encontrado al principio? Sea como fuere, ahora el problema consistía en situar a los nueve guardas. Los Matheuristas Monte-Luz sabrían hacerlo, desde luego.

Sams tuvo la impresión de que éstos acababan de subir sus honorarios.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MATHEMATICAL GEMS II. Ross Honsberger. Mathematical Association of America, 1976.

OLD AND NEW UNSOLVED PROBLEMS IN PLANE GEOMETRY. Victor Klee y Stan Wagon. Mathematical Association of America, 1991.

UNSOLVED PROBLEMS IN GEOMETRY. Hallard T. Croft, Kenneth J. Falconer y Richard K. Guy. Springer-Verlag, 1991.

Libros

Antonio Prevosti, Luis Alonso, Ignacio G. de la Rosa y Camilo J. Cela Conde

Biología teórica

Especie

Evolution and the recognition concept of species. Collected Writings of Hugh E. H. Paterson. Dirigido por Shane F. McEvey. The Johns Hopkins University Press; Baltimore, 1993.

Shane E. McEvey recopila en este libro 17 artículos de Hugh E. H. Paterson y sus colaboradores, la mayoría de los cuales tratan del concepto de especie propuesto por este autor, el concepto de reconocimiento. Sólo hay dos excepciones, el artículo 6, que es una nota necrológica de Cyril D. Darlington, y el 9, que aborda las ideas de Darwin sobre la especie.

Al igual que el concepto biológico formulado por los forjadores del neodarwinismo, el de reconocimiento parte de un planteamiento básicamente genético. Considera que los individuos de las especies con reproducción sexual cruzada comparten un acervo común de genes sin flujo genético con el reservorio de otras especies. Difiere, empero, del concepto biológico al estimar que la especiación no resulta de la evolución de mecanismos de aislamiento que limitan la reproducción entre las especies. En el fenómeno de la especiación, atribuye el principal papel a la evolución de los sistemas de señales, que sirven para que se reconozcan entre sí los individuos maduros de sexo distinto. Por servir para la reproducción, estos sistemas son funcionales. Constituyen, por tanto, mecanismos originados por selección natural.

El concepto de reconocimiento contribuye a comprender la especiación en los organismos de reproducción sexual cruzada. Señala que los mecanismos de reconocimiento de pareja dentro de la especie tienen, indudablemente, un papel en la especiación. Pero Paterson no se ciñe a conceder a estos mecanismos la relevancia que merecen, sino que se excede considerándolos los únicos responsables del origen de las verdaderas especies. Esta posición extremada se manifiesta notoriamente en el quinto artículo, que lleva por título "La búsqueda continua de lo desconocido y de lo incognoscible: una crítica de las ideas contemporáneas sobre la especiación". Refiriéndose a Dobzhansky dice: "Me siento, por tanto, deprimido cuando encuentro autores notables haciendo afirmaciones retóricas como 'la especiación puede producirse por más de un camino'. Los biólogos demasiado aficionados a la simplicidad y homogeneidad se muestran inquietos ante la inventiva del proceso evolutivo". Según Paterson existiría un solo modo de especiación, que sería una consecuencia incidental de la adaptación de una pequeña población hija de organismos sexuales a un hábitat diferente del normal de la población paterna. La evolución de un nuevo sistema de reconocimiento formaría parte del proceso conducente a una utilización más eficaz del ambiente. Este proceso, adaptativo, estaría dirigido por la selección natural, que tendría la consecuencia accidental de dar origen a una nueva especie.

Hasta cierto punto, el concepto de reconocimiento es la otra cara de la moneda del aislamiento sexual. Los primeros artículos de esta recopilación son también de los primeros publicados por Paterson y ponen especial énfasis en criticar las ideas de especiación por reforzamiento del aislamiento sexual, presentando como más adecuado el reconocimiento. Parece, por tanto, que las ventajas que aduce Paterson en el reconocimiento, como mecanismo de especiación más sencillo y directo, las descubrió al compararlo con el concepto de aislamiento sexual. El modo en que percibe la diferencia entre ambas nociones lo establece con claridad en el artículo 4, cuando comenta la interpretación errónea que Tampleton hizo de sus ideas al afirmar que "la razón de ser de un sistema de reconocimiento de pareja estriba en impedir el apareamiento con otras *Drosophila* simpátricas".

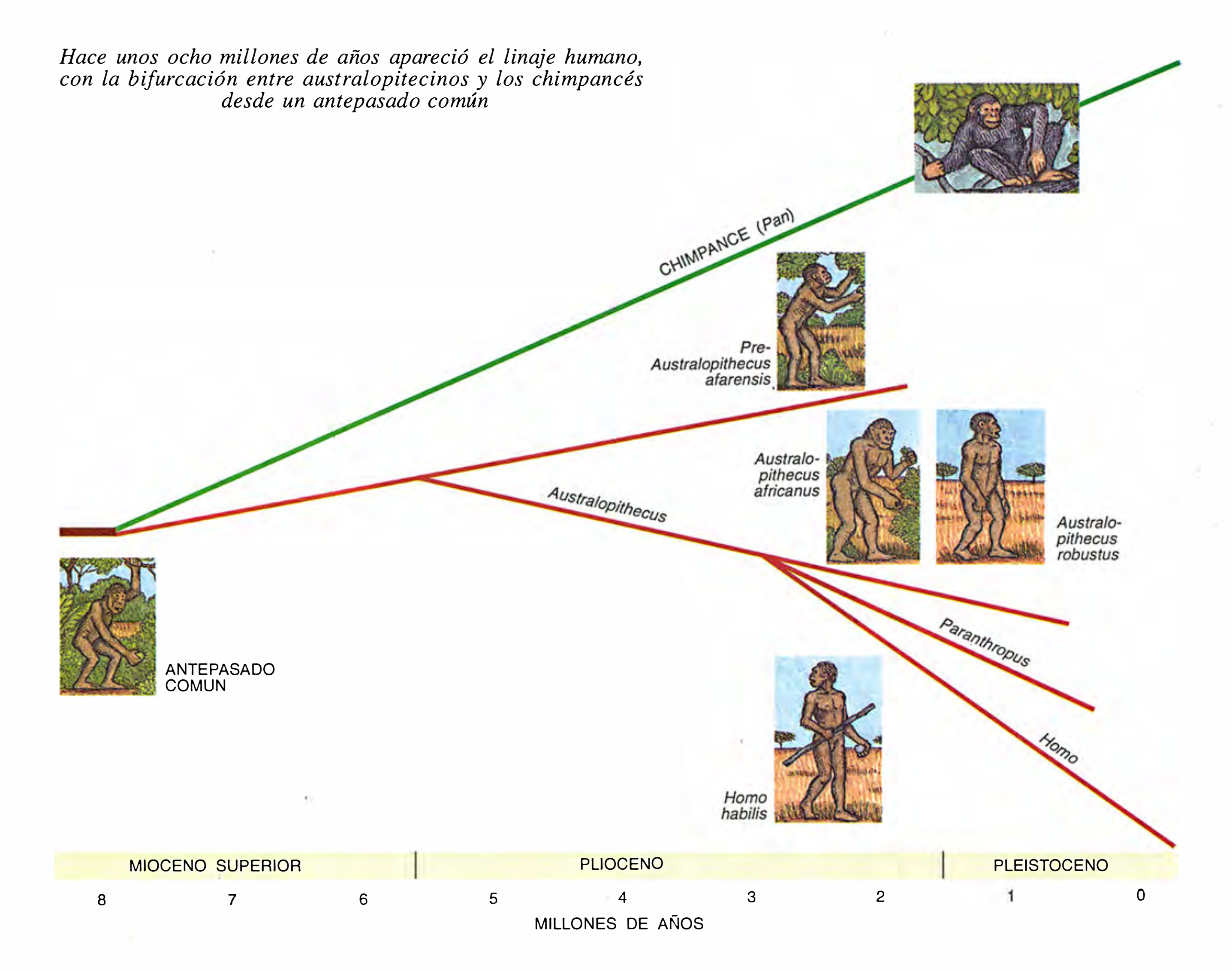
Según Paterson el concepto de reconocimiento halla su mejor definición en la expresión siguiente: "La razón de ser de un sistema de reconocimiento de pareja es asegurar una singamia eficaz dentro de una población que ocupa su hábitat preferido". De hecho, para que un taxón sea una buena especie importa que no pueda presentar flujo genético con otros taxa. Cuál sea el mecanismo que lo impide de reviste menos interés para la definición de especie.

Para su postulador, el concepto de reconocimiento se halla a salvo de los problemas de teleología que presenta la noción biológica. Considera finalista que ésta atribuya importancia a los mecanismos de aislamiento postcigótico. Esto sería cierto si, como Paterson admite, se les supusiera originados por selección natural. Todo el mundo, sin embargo, interpreta esos mecanismos como efectos secundarios de la diferenciación genética general que se produce en poblaciones que, por ser alopátricas, evolucionan independientemente.

Es cierto que los experimentos sobre el reforzamiento del aislamiento sexual se han realizado excluyendo la posibilidad de que resulte eliminada una de las poblaciones implicadas. Las simulaciones presentadas en el artículo 11 son interesantes en este sentido. No obstante, los experimentos criticados demuestran la existencia de variabilidad genética aprovechable para el reforzamiento y, por tanto, que éste es posible.

En el artículo 5, Paterson critica, desde su enfoque del reconocimiento, la función que algunos autores otorgan a las mutaciones cromosómicas en la especiación. En lo concerniente a los cambios estructurales discute principalmente las ideas de White, en particular su modelo de especiación estasipátrica.

Por otro lado, en este artículo quinto es donde se refleja con mayor nitidez la unidimensionalidad de sus ideas, al aceptar una vía única para la especiación. Rechaza un mecanismo de especiación tan universalmente admitido como la poliploidía. Para él, los autopoliploides deben considerarse un fenómeno intraespecífico porque comparten un sistema de reconocimiento de pareja común con los diploides paternos y pueden cruzarse aleatoriamente con ellos. Si pierden la reproducción sexual, carecen de los atributos de las especies propiamente dichas. Los alopoliploides de origen reciente deben asimilarse a



otros híbridos. Pueden, pues, originar buenas especies de alotetraploides por especiación alopátrica, ocupando un hábitat diferente del que caracterizaba a las poblaciones paternas, sobreviviendo en él y adquiriendo un sistema de reconocimiento de pareja único, al adaptarse al nuevo hábitat. Así, no se trataría de especiación instantánea por poliploidía, sino de especiación alopátrica según el modelo de reconocimiento.

En el artículo 13 se analizan las relaciones del concepto de reconocimiento con la paleontología. Como en algún otro artículo, considera que este concepto es totalmente congruente con la teoría de los equilibrios interrumpidos de Eldredge y Gould sobre la evolución de las especies.

En el artículo 15 Paterson explicita su actitud personal a la hora de elaborar las ideas científicas. La lectura del mismo nos permite afinar la valoración de tales ideas. El tema principal son las relaciones del concepto de reconocimiento con la visión estructuralista biológica. Paterson se expresa simpatizante de esta visión de la evolución. "Aunque no soy ningún estructuralista militante, comparto aspiraciones y objetivos con algunos estructuralistas. Por ejemplo, siento empatía por el interés de los estructuralistas por la totalidad, las ideas de transformación y de autorregulación". La actitud que le lleva a esta simpatía la expresa diciendo: "Mi objetivo es presentar una ordenación heterodoxa de información bien conocida, con objeto de dar una perspectiva nueva, más que nuevos hechos". No obstante, al final del artículo marca alguna diferencia. Al reseñar los vínculos que mantiene con la teoría sintética de la evolución, afirma: "Mucho de esta visión modificada del mundo será aceptable por los estructuralistas, pero probablemente no todo. Aún conservo un lugar para las explicaciones funcionalistas, aunque sopeso sus méritos uno por uno."

El conjunto de artículos recopilados da una visión muy completa de las ideas de Paterson sobre qué son las especies y cómo se originan. Si de algo peca es de que se encuentran propuestas y consideraciones que resultan bastante reiterativas, aunque esto queda compensado por el criterio con que pueden valorarse las ideas, abordadas desde perspectivas distintas. El libro termina con una bibliografía completa de H. E. H. Paterson. (A. P.)

Física del siglo XX

Bifurcaciones

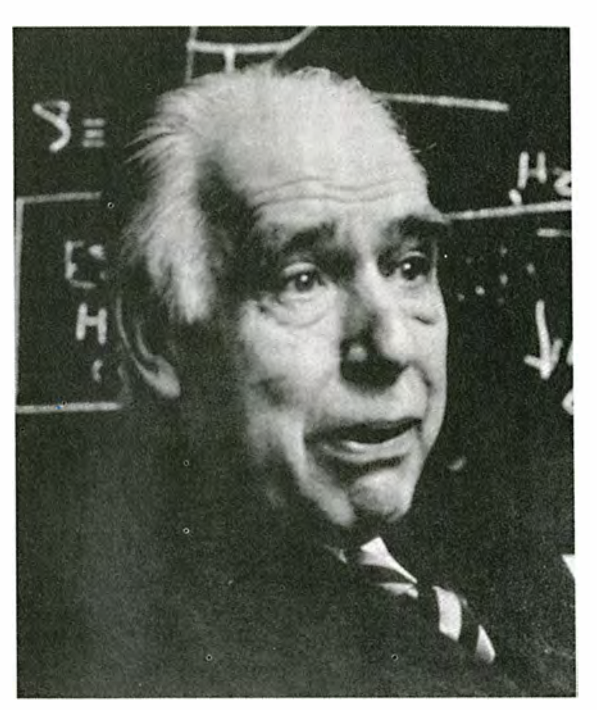
NIELS BOHR'S TIMES, IN PHYSICS, PHILOSOPHY, AND POLITY, por Abraham Pais. Clarendon Press-Oxford University Press; Oxford, 1993.

UNIFIED FIELD THEORIES IN THE FIRST THIRD OF THE 20TH CENTURY, por Vladimir P. Vizgin. Birkhäuser Verlag; Basilea, 1994.

En los primeros años de nuestro siglo dominaba todavía el convencimiento aristotélico de la continuidad de los fenómenos de la naturaleza. El cuerpo doctrinal más avan-

zado, vale decir, la mecánica de Newton, la electrodinámica de Maxwell y la misma relatividad especial de Einstein encajaban en ese marco. Pero la naturaleza sí procede a saltos. Esa sustitución de lo continuo por lo discreto define a la teoría cuántica.

Acaba de reimprimirse en edición económica *Niels Bohr's Times, in Physics, Philosophy, and Polity*, de Abraham Pais, físico eminente él y zurcidor único de las ideas del pasado reciente, con libros espléndidos sobre Einstein, a quien, como a Bohr, trató con intimidad. El libro sobre el danés, del que ya comienzan a aparecer versiones traducidas, constituye, como se decía antaño, un acontecimiento editorial. (No conozco nada semejante en el arte de sorprender *a radice* un concepto fundamental e ir siguiendo sus pasos hasta su cabal acotación semántica.) La biografía alcanza su clímax en la relación de Werner Heisenberg con Bohr, en particular la reconstrucción de la segunda estancia de aquél en Copenhague de 1926 a 1927.



Niels Bohr (1885-1962)

Con Niels Bohr (1885-1962) se cierra el ciclo fundacional de la física cuántica iniciado por Max Planck, instaurador de la teoría, y reforzado por Albert Einstein, descubridor del fotón o cuanto de luz. A Bohr se le debe la sistematización cuántica de la estructura de la materia. De los tres, como confesó Heisenberg, fue Bohr el que ejerció mayor influjo en la ciencia y en los profesionales de su tiempo. Y no sólo por su introducción del principio de complementariedad.

Bohr comenzó su carrera investigadora, antes incluso de licenciarse, con la solución experimental de un problema real, el de la determinación de la tensión superficial de los líquidos, planteado por Lord Rayleigh en 1879. Se había observado que, cuando un chorro con una sección eficaz no circular emerge de un tubo cilíndrico, vibra su superficie. Rayleigh mostró que, conocidas la velocidad y la sección eficaz del chorro, así como las longitudes de onda de sus vibraciones superficiales, podía determinarse la tensión superficial del líquido. Pero no realizó ningún experimento cuantitativo para corroborarlo. Y eso es lo que hizo Bohr, no sin introducir mejoras teóricas sustanciales, al tomar en consideración la viscosidad del líquido y del aire del medio y al extender las amplitudes infinitésimas de vibración originales a otras de magnitud variable.

Tras doctorarse, acudió a Cambridge para investigar con J. J. Thomson las propiedades del electrón. Pero su vida cambió de rumbo en Manchester, con Rutherford. Para el físico neozelandés, todo átomo constaba de un número Z de electrones, dotados cada uno de una carga eléctrica $-e$, y un pequeño cuerpo central (el núcleo), con carga Ze y miles de veces más pesado que el electrón, donde se concentraba casi toda la masa del átomo.

En 1913 Bohr llegaba ya a dos conclusiones importantes: primera, la existencia de espectros de bandas (de Balmer) denotaba que los electrones se movían en órbitas estacionarias discretas; segunda, los espectros reflejan saltos cuánticos entre esos estados.

Desde 1913 hasta 1924 se asiste a un período de incoherencia, caracterizado por el recurso a ecuaciones de la física clásica corregidas con reglas de cuantización. De acuerdo con una de éstas, el momento angular de un electrón en órbita en torno a un núcleo puede tomar múltiples valores enteros de $h/2\pi$, donde h es la constante de Planck. Reglas que claramente violan los principios de la mecánica clásica que expresan dichas ecuaciones. Pero, con paradojas y todo, la teoría progresa. Se demuestra que los estados atómicos se describen por varios número cuánticos. Comienza a verse que no todas las transiciones de mayor a menor nivel son legítimas. Y, por último, las líneas espectrales se definen no sólo por sus frecuencias, sino también por la intensidad de las mismas.

Pais descuartiza, para analizarlos, los dos períodos que distingue en el desarrollo y evolución de la teoría cuántica. Abarca el primero, período antiguo o de la vieja teoría cuántica, desde 1900 hasta 1925. A lo largo del primer cuarto de siglo se hallaron leyes y regularidades cuánticas. Bohr se consagra durante esos años al estudio de la estructura del átomo y a la consolidación de la teoría cuántica, con el principio de correspondencia, que establece la existencia de vínculos entre la teoría clásica y la nueva. Durante ese "período antiguo", él descubre el número cuántico principal, introduce las reglas de selección en las transiciones atómicas y trabaja sobre los estados fundamentales de átomos complejos (que apuntalan la química cuántica). Influye en el principio de exclusión de Pauli, que, a su vez, conduciría al descubrimiento del espín. (A tenor del principio de exclusión de Pauli, en el interior del átomo no puede haber dos electrones que tengan el mismo conjunto de números cuánticos.) Esos y otros hitos contemporáneos, así la estadística de Bose-Einstein y la de Fermi, descansaban muchas veces en analogías que, a la postre, resultaron ser falsas, como la asimilación de las órbitas atómicas a las trayectorias de los planetas en torno al Sol o la equiparación entre el espín y la rotación orbital planetaria.

La segunda fase de la teoría cuántica se anuncia con el nacimiento de la mecánica cuántica, alumbrada en 1925 por la mecánica de matrices de Heinseberg, un algoritmo matemático que entonces no era excesivamente familiar a los físicos. Hubo, el año siguiente, un segundo parto, la mecánica ondulatoria de Erwin Schrödinger. Ambas versiones, se vio muy pronto, eran de hecho idénticas. La mecánica cuántica sentenciaba a muerte la idea de causalidad, decisiva para la física clásica. Para ésta, si conocíamos la posición y velocidad de una partícula en un momento dado, aplicando las leyes de Newton podíamos predecir qué posición y velocidad tendría la partícula un instante ulterior. Pero la premisa, objetarán las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, es falsa en mecánica cuántica: por principio no podemos conocer con suficiente precisión todos los

fenómenos que determinan un fenómeno. Bohr sustituirá la predicción cierta por la probabilidad de lo que sucedería a la partícula un momento ulterior.

En mecánica cuántica, además y según Bohr, carecía de sentido preguntarse si la luz o la materia *constaban* de partículas o de ondas. La pregunta bien formulada debía abordar si la luz o la materia *se comportaban* como ondas o como partículas. La solución deshace la ambigüedad al especificar el montaje experimental. La complementariedad, intuición genial de Bohr, es la confirmación de que el comportamiento de onda y el de partícula, aunque mutuamente excluyentes, resultan necesarios para una explicación completa de los fenómenos.

El éxito de la mecánica cuántica a mediados de los años veinte impuso el repliegue de otra corriente que le venía disputando el terreno de la interpretación del mundo, las teorías unificadas de campos, objeto de investigación de Vladimir P. Vizgin en *Unified Field Theories in the First Third of the 20th Century*, publicada en ruso en 1985 y que la editorial Birkhäuser ha rescatado para su prestigiosa colección "Science Networks-Historical Studies".

Pese a la influencia heurística y conceptual (a propósito, por ejemplo de la noción de campo de aforo) que las teorías de unificación ejercieron en la teoría cuántica, la verdad es que constituyeron dos líneas de creación de la física de nuestra era antagónicas. Conocidas las notas características de la teoría cuántica, las teorías unificadas se definían por la continuidad (campo clásico), la causalidad, la arquitectura matemática, la geometrización (es decir, la naturaleza geométrica de las entidades fundamentales), la invarianza y el método axiomático-deductivo de la solución del problema de la unidad.

Los antecedentes inmediatos hay que buscarlos en la segunda mitad del siglo pasado, cuando Maxwell y los maxwellianos incorporaron la idea de campo electromagnético como ingrediente básico de su descripción física del mundo. Las teorías unificadas más avanzadas se propusieron subsumirlo, con el campo gravitatorio de la relatividad einsteiniana de 1916, a modo de manifestaciones de una sola estructura de espacio-tiempo.

Vizgin aplica el concepto lakatosiano de programa para referirse a las distintas corrientes articuladas en torno a un núcleo temático. De acuerdo con ese planteamiento, el programa del campo electromagnético sería deudor de las formulaciones de Wiechert y de Larmor que atribuían al éter la condición de realidad primaria; sus estados excitados originaban las partículas cargadas (los electrones de Thomson). Suponíase, además, que las leyes newtonianas de la mecánica podían inferirse de las ecuaciones del campo electromagnético. El principal modulador del programa, Lorentz, cantaba en 1900 los éxitos obtenidos, si bien admitía que quizá la gravedad quedara al margen de la explicación básica, por lo que ese mismo año se aprestó a conseguir la reducción de la gravedad al electromagnetismo, basándose en la generalización de la noción de campo.

La geometrización penetra en el programa con la teoría general de la relatividad, de la mano de Einstein, por supuesto, pero sobre todo de Mie y Hilbert. Sin embargo, la primera teoría unificada de campos perfectamente geometrizada es obra de Weyl, alumno de Hilbert. Weyl generalizó la geometría de Riemann de suerte tal que ambos campos, el gravitatorio y el mecanocuántico, pudieran considerarse fenómenos geométricos. No se trata, empero, de ninguna reducción de uno en el otro. Las teorías unificadas tienen su canto del cisne en torno a los años que rodean al de 1921, cuando el testigo de Weil lo recoge Einstein, nada cómodo en la entonces nebulosa cuántica, y se suceden los enfoques matemáticos (dimensionales). (L. A.)

Astronomía

Planetas rocosos

Morphology of the rocky members of the solar system. Elazar Uchupi y Kenneth Emery. Springer-Verlag; Berlín, 1993.

Todo el mundo es consciente de la enorme extensión de las plantaciones de marihuana que existen en Júpiter. O, al menos, así lo afirma el prestigioso científico holandés Christiaan Huygens (1629-1695), fundador de la teoría ondulatoria de la luz. Si nuestra solitaria luna terrestre sirve para ayudar a los marineros en la navegación, las cuatro lunas de Júpiter deben implicar muchos marineros en ese planeta. Muchos marineros implican muchos barcos; muchos barcos implican muchas velas y muchas velas implican muchas cuerdas. Tantas cuerdas sólo pueden proceder de extensas plantaciones de *Cannabis sativa* de la que se obtienen las fibras de cáñamo.

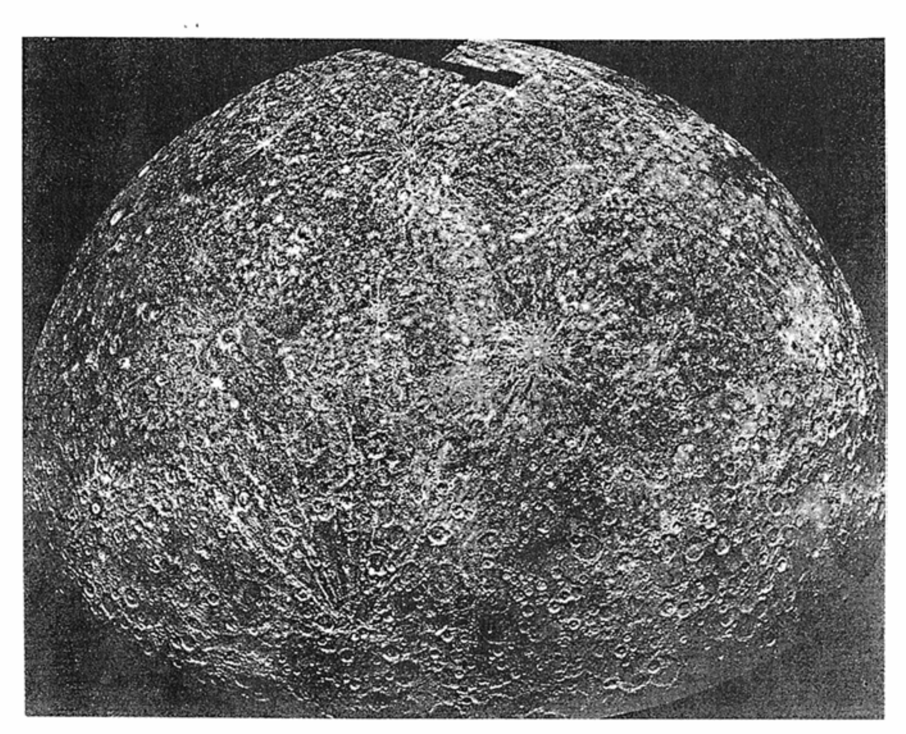
Más recientemente, en 1966, el comportamiento orbital anómalo de Fobos, una de las lunas de Marte, sugería a Sagan y Shklovskii que podía tratarse de una nave espacial lanzada por una antigua civilización en decadencia. Hubo que esperar a que la nave *Mariner 9* obtuviera las primeras fotografías cercanas para demostrar que Fobos es una montaña volante, cuyo movimiento peculiar estaría ocasionado por las fuerzas de marea del planeta. Casualmente, un siglo antes del descubrimiento de las lunas marcianas, Jonathan Swift en "Los Viajes de Gulliver" atribuyó a Marte dos lunas ficticias, cuyos períodos orbitales resultaron ser parecidos a los de Fobos y Deimos.

Todos estos ejemplos evocan el camino tortuoso que ha seguido el conocimiento de nuestro sistema solar, jalonado de tantos errores como aciertos.

Es obvio que nuestra comprensión del sistema solar ha avanzado al arrastre de la cantidad y calidad de las observaciones disponibles. Y que esa cantidad y calidad han tenido un crecimiento espectacular. En 1972, tras la misión *Mariner 9*, el nivel de información alcanzado sobre Marte era varios miles de millones de veces superior al existente en tiempos de Huygens. La resolución espacial de las imágenes del planeta también había aumentado en un factor de 10.000.

Uno de los aspectos más hermosos de la ciencia, su capacidad de predicción, no sale bien parado de un método de conocimiento que ha ido tan a la zaga de las observaciones. Los ejemplos de predicciones científicas certeras no han sido abundantes en el estudio del sistema solar. Si exceptuamos, entre otros, el brillante descubrimiento del planeta Neptuno o la observación indirecta de los anillos en Urano, casi todas las características morfológicas de los planetas han sido descubiertas de la manera más obvia posible: acercándose a ellos.

Pero la gloria de esos acercamientos no es tanto de la ciencia cuanto de la tecnología, que ha sido capaz de enviar laboratorios con cámaras fotográficas —y poco más— hasta zonas remotas del sistema solar. En casi todos los descubrimientos, los científicos han desempeñado un papel secundario. Exagerando un poco más, podemos decir que han quedado relegados a escribir libros como el que nos ocupa, donde se limitan a describir, con palabras muy técni-



Hemisferio meridional de Mercurio

cas, las últimas fotografías que han recibido de las naves espaciales.

El enfoque morfológico y descriptivo que han escogido los autores de esta obra, siendo importante, está muy lejos de colocar a la ciencia en el lugar que le corresponde al frente de la investigación planetaria. La ciencia está capacitada y "obligada" a descubrir algo así como la "ecuación del planeta". Una fórmula que permitiera deducir el aspecto actual y la evolución futura de un planeta o satélite con sólo introducir unos pocos parámetros como la masa, la distancia al Sol, la composición química de la nube primordial y la presencia de objetos cercanos. Con ella se podrían predecir las características de los planetas o satélites todavía no observados y poner, de camino, un poco de coherencia en el grueso catálogo planetario.

Me acerqué al libro con un rosario de preguntas que sirvieran de sensor para calibrar hasta qué punto satisfacía nuestras expectativas. ¿Por qué es tan distinto el plano de una galaxia del plano del sistema solar? ¿Por qué Titán tiene atmósfera y no Ganímedes, si ambos presentan masa y temperatura similares? ¿Dónde está el límite que separa los cuerpos esféricos de los irregulares? ¿Cómo se correlaciona la altura de los accidentes del relieve con la masa del planeta?, etcétera. Después de la lectura las preguntas siguen sin respuesta. Los autores se han mantenido en el ámbito de la morfología descriptiva y sólo han globalizado su estudio en las últimas 26 páginas de la obra, dedicadas a *Sumario y Conclusiones.*

La pretendida exhaustividad del libro se convierte en su mayor enemiga. Con más de mil referencias científicas distribuidas en menos de 350 páginas es casi imposible tejer una historia continua. Las frases aparecen entorpecidas por abundantes paréntesis con nombre propio y año. Los apartados se convierten en la suma de los resúmenes de varios autores y el volumen entero se acaba pareciendo más a una tela formada por retales cosidos que a un tejido coherente. En muchas ocasiones, tantas referencias concretas mantienen oculta la visión general. Los árboles no dejan ver el bosque.

La vigencia de la obra está garantizada por mucho tiempo, ya que en ella se recogen los resultados de las últimas misiones espaciales. Sólo las investigaciones de la nave Galileo, que llegará en diciembre de 1995 a Júpiter, podrán dejar anticuados algunos apartados del libro. Desafortunadamente, la nave *Mars Observer* dejó de funcionar en 1993 antes de comenzar su misión, que no era otra que la de cartografiar la superficie de Marte y analizar las variaciones topográficas y atmosféricas durante un año marciano.

Se incluyen capítulos dedicados a cada uno de los planetas interiores, además de a la Luna, y otro en el que se estudian todos los satélites de los planetas gaseosos. Es sorprendente comprobar que nuestro conocimiento de algunos planetas o satélites se reduce a unas pocas fotografías. Por ejemplo, casi todo lo que se conoce de Mercurio se aprendió durante tres breves pasadas de la sonda *Mariner 10* en 1973-74. Venus, por el contrario, ha sido visitado con más asiduidad. La primera aproximación del *Mariner 2*, en 1962, fue seguida por más de una docena de sondas espaciales. Recientemente, la nave *Magallanes* ha penetrado con sus radares en la densa atmósfera venusiana, proporcionando mapas detallados de la superficie del planeta. Marte fue "descubierto" en 1971 por la sonda *Mariner 9*. Pero, a la llegada de la nave, el planeta se encontraba envuelto en una inmensa tormenta de polvo, que impidió durante tres meses distinguir estructuras superficiales. Si la visita hubiera sido demasiado breve, ¿qué imagen nos habríamos formado del planeta rojo? Júpiter y Saturno, junto con sus numerosas lunas, han sido estudiados por las dos naves Voyager. La *Voyager 2* completaba luego su trabajo con la observación de Urano y Neptuno en 1986 y 1989, respectivamente. De muchas de sus lunas se dispone sólo de una fotografía.

El planeta Tierra también se ha beneficiado de una mirada espacial, que, además de colocarlo en su justo lugar del universo, ha permitido a los investigadores calibrar la calidad de sus observaciones. En 1993, un grupo de científicos liderados por Carl Sagan daba a conocer los resultados de su particular "búsqueda de vida en la Tierra". Así comienza su artículo publicado en *Nature*: "A su paso por la Tierra, en diciembre de 1990, la nave Galileo encontró pruebas de abundante oxígeno gaseoso, un pigmento ampliamente distribuido por su superficie con un aumento brusco de la absorción en la parte roja del espectro visible, y de metano atmosférico en extremo desequilibrio termodinámico; todo ello sugiere poderosamente la presencia de vida en la Tierra. Además, la detección de transmisiones de radio moduladas en amplitud, de banda estrecha y pulsantes, parece solamente atribuible a inteligencia."

El análisis de imágenes de alta resolución de dos continentes, Australia y la Antártida, no proporcionó señales de civilización. Si todavía carecemos de la capacidad suficiente para detectar con claridad la importante huella del hombre en la Tierra, debemos sospechar que, hasta ahora, nuestras naves se han perdido la mayor parte del sistema solar. (I. G. R.)

Política científica

Fin de siglo

PROMETHEUS BOUND. SCIENCE IN A DINAMYC STEADY STATE, por John Ziman. Cambridge; Cambridge University Press, 1994.

Si usted fuera un alienígena, alguien venido, digamos, de la galaxia Andrómeda y deseoso de saber cómo funciona la ciencia en la Tierra, haría bien en precipitarse hacia el libro de John Ziman.

El supuesto resulta quizás exótico, pero el propio Ziman lo justifica. Una doctora que viaja por el espacio/tiempo, la doctora van Rip, es el recurso estilístico que le permite a Ziman llamar la atención sobre los profundos cambios que ha sufrido la ciencia en los últimos treinta años. Las respuestas a la curiosidad y la sorpresa de van Rip son el fundamento de *Prometheus Bound*.

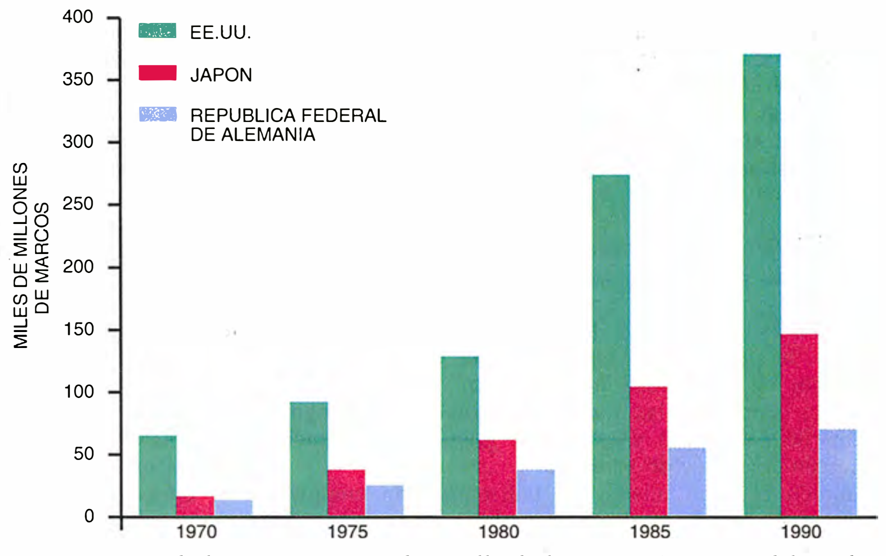
Ziman resume muy bien dónde debe buscarse el sentido de esos cambios: en la profunda transformación que está teniendo lugar en los planes institucionales de soporte de la investigación. El mundo de la ciencia de hoy en día, comparado con el que existía treinta años atrás, está lleno de palabras —de conceptos— que convierten el ámbito científico en una especie de superministerio de economía o consejo de administración de una multinacional: competitividad, indicador, eficacia, prioridad, política, estrategia, gastos generales... Bajo las siglas de I + D se esconde todo un mundo que tiene poco que ver con la imagen romántica del científico que toca el violín, saca la lengua y, en sus ratos libres, descubre la teoría general de la relatividad. Usando de nuevo las palabras del propio Ziman, "en menos de una generación hemos presenciado una *radical* e *irreversible transformación mundial* en la manera como se organiza y lleva a cabo la ciencia".

No es la primera vez que Ziman dedica sus esfuerzos a estudiar la relación que existe entre ciencia y sociedad o se interesa por el triángulo que forman la política, la investigación y el acontecimiento histórico. No resulta nada extraño, pues, que diferentes capítulos de *Prometheus Bound* se encarguen de ilustrarnos acerca de la búsqueda de recursos para la investigación, la forma como los administradores públicos se adaptan a los nuevos tiempos, el sentido multinacional y de estabilidad dinámica de la ciencia del fin de siglo o el significado actual de una "carrera científica". A quienes están metidos en ese mundo, el libro de Ziman les resultará familiar, inquietante y útil; a los que se acercan a la ciencia con la curiosidad del aficionado que se encuentra capacitado para mirar entre bastidores, Ziman les abre todo un abanico de claves que les permitirán entender mejor lo que está pasando en nuestros días con la política científica.

En todo libro hay algunos pasajes que le resultan especialmente atrayentes al lector. El que sean unos u otros depende, claro es, de quién está leyendo. Pero no creo que sea difícil coincidir en el interés que tiene uno en concreto de los muchos planteamientos que se deslizan por las páginas de *Prometheus Bound*: el del papel de la ciencia pura. Ya sea por la nostalgia con la que se contempla la actividad del científico *tout court* o por la presencia masiva en nuestras universidades de investigadores que eligen sus proyectos llevados por motivos todavía poco sistematizados, la idea de una ciencia pura es algo que cuenta con un peso específico importante en España.

La convergencia de la investigación básica y aplicada en los laboratorios, una de las características más importantes de la ciencia en su estado de estabilidad dinámica, provoca una crisis para la ciencia pura tal como se entiende de manera general, es decir, como proyectos de investigación cuyo interés para la industria a corto —e incluso a largo— plazo brilla por su ausencia. Ziman no derrama ninguna lágrima por esa especie de idealización de la ciencia pura. Muy al contrario, sostiene que ni las razones culturales ni la apelación a la "curiosidad humana" son razones en favor de una ciencia en su estado puro: son meras constataciones descriptivas de ese tipo de ciencia, pero no la justifican valorativamente hablando. Si se pretende abogar por la ciencia pura, habrá que buscar las razones sociales que la convierten en deseable. Sin embargo el argumento no es demasiado sólido —podría haber razones antropológicas en favor de ese tipo de ciencia, y no meramente sociales— ni hace justicia a las virtudes de lo que el mundo anglosajón llama *serendipity*: la posibilidad de que un hallazgo casual y aparentemente vacío desde el punto de vista de su utilidad práctica esconda algo de gran valor inmediato.

No debe sacarse la conclusión de que *Prometheus Bound* es un alegato contra la ciencia pura. Ziman niega la pertinencia de distinguir, en el estadio de la estabilidad dinámica, entre dos tipos diferentes de ciencia, la pura y la aplicada. Si la viabilidad de un proyecto de investigación se basa en razones estratégicas a largo plazo —las dominantes en la ciencia actual— es muy difícil que ningún proyecto de "buena ciencia" se quede sin financiar. Cuando al final del libro usa el concepto de estrategia de investigación para criticar a los científicos que insisten en separar la ciencia pura de la aplicada, lo que está sugiriendo es la necesidad de acabar con el dualismo y situar toda la ciencia, ya sea inmediatamente aplicable o no, dentro de esa nueva condición. La doctora van Rip, en cuanto se recupere de su viaje por el espacio/tiempo, podrá trabajar en paleontología, si lo desea. Siempre habrá una compañía de petróleos a la que le parezca que eso tiene, en realidad, mucho, pero que mucho interés. (C. J. C. C.)



Financiación de la investigación y desarrollo de los tres países más adelantados

Anne Eisenberg

El arte del insulto científico

El físico Wolfgang Pauli se hizo famoso porque, en sus seminarios y conferencias, para desaprobar un trabajo que no era de su particular gusto lo apartaba con la despectiva apostilla de "*ganz falsch*", totalmente falso, o con la más cruel aún de "*nicht einmal falsch*", ni siquiera falso. No fue Pauli el único en practicar esas tajantes descalificaciones que los ingleses denominan *pinking* (puyazo o dentellada). Los científicos ocupan un puesto de honor en la historia del insulto dispensado con talento. Bajo la epidemis de un texto aséptico y formal se oculta un vasto subtexto cargado de vitriolo.

Isaac Newton, por ejemplo, era un mordaz polemista. Al dirigir sus ataques contra Robert Hooke y Gottfried Leibniz, iba afilando sus argumentos en sucesivos borradores, cada uno de los cuales, según un biógrafo, era más punzante que el anterior. "El Sr. Hook se piensa que le toca a él reprenderme por estar dando de lado a las ideas de mejorar los tratados de Optica con las *Refracciones*", escribió Newton en un aparte. "Pero bien sabe él que ningún hombre puede dictar reglas para los estudios de otro, sobre todo si no entiende los fundamentos en que ese otro se basa para proceder como lo hace." Cuando Leibniz publicó su cálculo sin reconocer que tenía noticia de los progresos de Newton, éste le atacó, a veces por mediación de John Keill [Johann Bernoulli se refería a Keill como al "cepillador de Newton"], otras veces a través de un comité de la Real Sociedad de Londres. Llegó inclusive a ponerle, entre las notas matemáticas a pie de página del *Commercium epistolicum*, una comprimida acusación de lo que entonces se tenía por autor plagiario: "Así que el método del que antes él [Leibniz] carecía y, habiéndolo pedido, lo recibió y entendió con dificultad, a buen seguro que lo ha descubierto él..."

La cuestión de la prioridad incita a los más encarnizados asaltos, pero la ignorancia, particularmente cuando los científicos se salen del terreno que dominan, constituye también fuente fecunda. Ocurrió así con el belicoso Hermann Kolbe, que fue en el siglo XIX una figura importante de la química, aunque con una lastimosa falta de interés por la actividad óptica. Kolbe se atrevió a ridiculizar en el *Journal für Praktische Chemie* a Jacobus Henrikus van't Hoff, que había puesto de manifiesto, en un brillante trabajo, la relación entre la actividad óptica y la estructura molecular . "A un tal Dr. J. H. van't Hoff, de la escuela veterinaria de Utrecht, no le agrada, por lo que parece, la exactitud de las investigaciones químicas", escribió Kolbe. "Ha creído más oportuno montarse en Pegaso (que obviamente está de prestado en la escuela veterinaria) y proclamar en su *La chimie dans l'espace* cómo, durante su vuelo hasta la cumbre del Parnaso químico, le pareció que los átomos se habían ido agrupando por la inmensidad del universo." Van't Hoff supo vengarse; reprodujo las mofas de Kolbe en la segunda edición de *La chimie* y, con ello, granjeó para aquél la reputación histórica de estúpido.

También el chauvinismo, la patriotería, da empuje al puyazo científico. Marie Jean Pierre Flourens, reputado biólogo francés, escribió en su recensión de *The Origin of Species* de Darwin: "...[qué] confusión de ideas, qué falsedades! ¡Oh lucidez, oh francesa estabilidad de la mente, ¿qué ha sido de vosotras?!" Y el químico sueco Jöns Jakob Berzelius, que solía enfrascarse en la lectura de los manuales escritos por otros cuando la gota le obligaba a guardar cama, anotó: "Los químicos ingleses viven encerrados en su propio mundo....Litigan entre sí con gran encono por el reconocimiento de la primacía en los asuntos más nimios....puede mirárseles como se mira a unos cachorrillos que se enzarzan en peleas por apoderarse de unos huesos cuya carne ha sido ya roída en el Continente."

En la historia de la ciencia abundan los avisos y amonestaciones, nada proféticos por cierto, desde los comentarios del doctor Darwin, padre de Charles, a su hijo ("Sólo te interesan la caza, los perros y el matar ratas. Serás una auténtica desgracia para ti mismo y para toda tu familia") hasta los del director de la escuela en que estudiaba Albert Einstein cuando se le preguntó qué profesión debería éste seguir: ("No importa cuál; nunca logrará el éxito en ninguna"). Elihu Thomson, notable ingeniero electricista, visitó el taller de Thomas A. Edison y declaró luego a la prensa que "no tenía en muy alta opinión la lámpara de Edison y que no esperaba para ella un gran futuro." Louis Agassiz, exigente naturalista que llegaría a ser profesor de Harvard, sostenía que él "sobreviviría a esta manía" de la evolución, a la que calificó de "error científico".

Las conferencias de prensa aceleran en ocasiones el *tempo* de los tijeretazos, vapuleos y engrescamientos científicos una vez ha sido despachada la mayor parte de ellos en debates, cartas, simposios y recensiones críticas. Edison sacó provecho de los periódicos en su bien orquestada campaña contra la nueva CA (corriente alterna) repartiendo sistemas que eran mucho más potentes que su limitada CC (corriente continua). En la que se llegó a conocer como la "Guerra de las Corrientes", Edison invitó a los reporteros y a cuantos testigos quisieran a que durante todo un año, el 1887, observasen cómo unos perros y gatos callejeros de West Orange, N. J., se agitaban espasmódicamente bajo unas delgadas láminas y eran electrocutados por descargas de corriente alterna de alta tensión.

Actualmente los científicos suelen ser más circunspectos. Antes de soltar la lengua consultan a sus abogados, como lo hizo Steven E. Koonin cuando, presidiendo la sección de física nuclear de la Sociedad Norteamericana de Física, se disponía a disertar sobre la fusión fría en su reunión de 1989. Avisado de que evitase el "término F" (fraude), Konnin devaluó el trabajo de Stanley Pons y Martin Fleischmann sobre la fusión fría con la fatal frase "incompetencia y, quizás, engaño".

No todas las puyas son cáusticas —algunas pocas de ellas no pasan de ser afectuosos pellizcos, como lo fue el comentario de un profesor de Edimburgo a propósito de una velada que había disfrutado con Charles Babbage ("Me costó pero que mucho librarme de él a las dos de la madrugada, después de una velada deliciosísima"). Otras quieren ser incluso cumplidos. Pauli, que dominaba ya el arte del doble sentido cuando aún no era más que simple doctorando, asistía a cierto seminario dado por Einstein y reconoció generosamente: "¿Sabes?, lo que el profesor Einstein dice no es tan necio."

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



AGRICULTURA PARA LOS PAISES EN DESARROLLO, por Francesca Bray

El modelo occidental de agricultura muy capitalizada y supermecanizada puede no ser el adecuado para toda región en desarrollo. Quizá sean mejores los sistemas de policultivo intensivo, cuyo ejemplo más notorio es el del arroz.

MOLECULAS SINTETICAS AUTORREPLICANTES, por Julius Rebek, Jr.

En los laboratorios se ensamblan moléculas que pueden hacer copias de sí mismas, "mutar", competir por los recursos y asociarse, proporcionando un paradigma de la vida.

EFECTO TUNEL CUANTICO EN POLOS MAGNETICOS, por Javier Tejada y E. M. Chudnovsky

La observación de la relajación magnética, a bajas temperaturas, en diferentes sistemas, permite descubrir fenómenos cuánticos de efecto túnel.

LOS MANATIES, por Thomas J. O'Shea

Estos gigantescos ramoneadores acuáticos aventajaron a sus rivales del Nuevo Mundo. Ahora no tienen otro enemigo que los seres humanos, de quienes depende su supervivencia.

JEAN HENRI FABRE, por Georges Pasteur

Este entomólogo solitario se convirtió en uno de los educadores más conocidos de su tiempo. Hoy podemos apreciar la minusvaloración de sus logros científicos junto a las debilidades de su metodología.

BARRERAS A LA ENTRADA DE FARMACOS EN LOS TUMORES SOLIDOS, por Rakesh K. Jain

Muchos tumores oponen resistencia a la entrada de agentes anticancerosos. Esta es una de las razones del fracaso clínico de fármacos que consiguen destruir las células tumorales en condiciones de laboratorio.

EL LEGADO CIENTIFICO DEL PROYECTO APOLO, por G. Jeffrey Taylor

Las piedras lunares traídas a la Tierra han servido para zanjar cuestiones relativas al origen de la Luna, a su composición e incluso a las condiciones primigenias que afectaron a la vida en nuestro planeta.

¿PUEDE EXPLICARSE LA CONCIENCIA?, por John Horgan

¿Qué es la conciencia? ¿Puede explicarla la neurobiología o, por el contrario, y como objetan algunos filósofos, es un fenómeno esquivo que trasciende la ciencia experimental?

